

Aalto-yliopisto
Insinööritieteiden korkeakoulu
Koneenrakennustekniikan laitos

Tuomas Yrjövuori

Aerostaattisen tiivisteen suunnittelu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten
Espoossa, 17.5.2017

Valvoja: Professori Petri Kuosmanen
Ohjaaja: Tekniikan tohtori Olof Calonius

Tekijä Tuomas Yrjövuori

Työn nimi Aerostaattisen tiivisteiden suunnittelu

Koulutusohjelma Konetekniikka

Pääaine Koneensuunnittelu

Koodi K3001

Työn valvoja Professori Petri Kuosmanen

Työn ohjaaja TkT Olof Calonius

Päivämäärä 17.5.2017

Sivumäärä 82 + viii

Kieli suomi

Tämä työ käsittelee aerostaattisen tiivisteiden suunnittelua, soveltamista osaksi kammiollista ilmalaakeria sekä näiden suoritusarvomittauksia. Aerostaattinen tiiviste on samanaikaisesti sekä ilmalaakeri että tiiviste. Tavoitteena oli selvittää tällaisen tiivisteiden toimivuutta ja erityispiirteitä sovellettaessa sitä osaksi paineilmakäyttöistä paperikoneen telan taipumakompensointijärjestelmää. Nykyiset järjestelmät perustuvat pääasiassa hydraulioöljyn painevaikutukseen. Ilman erittäin alhaisen viskositeetin ansiosta öljyn korvaaminen paineilmalla mahdollistaa näiden järjestelmien energiatehokkuuden parantamisen.

Mittauksia varten valmistettiin tasomainen ilmakammiollinen laakeri, jonka aerostaattinen tiivistereuna koneistettiin teknisestä muovista. Laakeripinnan ilmakuristukset valmistettiin laserporaamalla. Tiivisteiden kuormaa säädettiin paineilmakäyttöisellä letkulla. Laakerin kammiopaine, tiivisteiden syöttöpaine ja kuormaletkun paine olivat erikseen säädettävissä. Mittaukset suoritettiin sorvin runkoa hyödyntävässä testipenkissä. Tiivisteiden toimivuuden arviointiin käytetyn tasomaisen koelaakerin avulla oli rajalliset mahdollisuudet selvittää telageometriaan liittyviä erityispiirteitä. Mittaustulosten perusteella oli kuitenkin mahdollista arvioida hypoteettisen paineilmalla taipumakompensoidun telan energiatehokkuutta.

Laserointi osoittautui toimivaksi muovitiivisteiden ilmakuristusten valmistusmenetelmäksi. Koelaakerin ilmankulutus tiivistereunan pituuteen suhteutettuna ei merkittävästi poikennut kaupallisten laakerien ilmankulutuksesta. Parantamisen varaa oli tiivisteiden stabiliteetissa vastinpinnan pyöriessä vinosti asemoituna. Tiivisteiden kuorman säätäminen vaati tarkkuutta, mikä osaltaan johtui tiivistepinnan pullistumisesta syöttöpaineen vaikutuksesta ja siitä seuranneesta ilmakalvon pinta-alan laskusta. Tiivistemateriaalin valintaprosessin apuna olisi suositeltavaa käyttää tiivistekonstruktion elementtimenetelmään perustuvaa mallinnusta. Koelaakerin puutteista huolimatta työn aikana vahvistui ajatus siitä, että energiatehokkaan taipumakompensointijärjestelmän suunnitteleminen ja rakentaminen olisi mahdollista.

Avainsanat aerostaattinen tiiviste, ilmalaakeri, taipumakompensoitu tela



Author Tuomas Yrjövuori		
Title of thesis Design of aerostatic sealing		
Degree programme Mechanical Engineering		
Major Machine design		Code K3001
Thesis supervisor Professor Petri Kuosmanen		
Thesis advisor Olof Calonius, D.Sc. (Tech.)		
Date 17.5.2017	Number of pages 82 + viii	Language Finnish

This thesis deals with both the design of an aerostatic sealing for use as a part of a thrust bearing and measuring the performance characteristics of the bearing. An aerostatic sealing is simultaneously a sealing as well as an air bearing. Aim of the study was to check the functionality of this kind of sealing and find out problems related to applications of the sealing as a part of a deflection compensated roll. Today the rolls with a deflection compensation system utilize the pressure effect of hydraulic oil. The research was based on the idea that energy efficiency can be improved by utilizing low viscosity air instead of oil.

The measurements were made using a thrust bearing with a flat counter-surface. The aerostatic surface of the sealing was machined using plastic as a material. The air nozzles of the sealing were drilled by using a laser cutting machine. During the tests the load of the sealing was adjusted by controlling the air pressure of the flexible pipe. The pressure of the air chamber, the pressure of the sealing and the load of the sealing were separately adjustable. The performance measurements were made using a lathe as a test bench. Because of the planar contact geometry of the experimental bearing many of the problems related to roll geometry could not be solved. Nevertheless with the results gained it was possible to estimate the energy efficiency of the hypothetical pneumatic roll.

Laser drilling proved to be a useful method for manufacturing air nozzles. According to the performance measurements the air consumption of the bearing did not indicate significant difference between commercial bearings and the test bearing in proportion to the length of the sealing. However there were some problems with the stability of the bearing when the counter-surface was angularly displaced. Adjusting the load of the sealing required accuracy. The area of the air film decreased because of the sealing bulge due to internal pressure. A comprehensive material selection process guided by finite element method should be recommended. During the research, the idea was confirmed that it would be possible to design and construct an energy-efficient deflection compensation system.

Keywords aerostatic sealing, air bearing, deflection compensated roll

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty Aalto-yliopiston Koneenrakennustekniikan laitokselle.

Osoitan lämpimät kiitokseni valvojalleni professori Petri Kuosmaselle sekä ohjaajalleni TkT Olof Caloniukselle aiheen tarjoamisesta ja työn järjestämisestä. Haluan kiittää myös Santtu Teerihalmetta työssä tarvittujen osien valmistuksesta, ja Jouni Pekkarista, Antti Sinkkosta, Esa Kostamoa, Jari Kostamoa ja Vesa Saikkoa opastuksesta työstökoneiden ja mittalaitteiden parissa. Kiitän myös Tapio Lantelaa, Raine Viitalaa ja koko laitoksen henkilökuntaa hyvistä ajatuksista ja neuvoista.

Espoossa, 17.5.2017

Tuomas Yrjövuori

Symbolit

A	Pinta-ala [m ²]
C_d	Purkauserroin
c	Vaimennuserroin [kg/s]
D	Halkaisija [m]
d	Halkaisija [m]
E	Kimmokerroin [GPa]
F	Voima [N]
G	Paino [N]
h	Ilmaraon korkeus [μm]
K	Painesuhde
K_{lim}	Painesuhteen raja-arvo
k	Jousivakio [N/mm]
m	Massa [kg]
\dot{m}	Massavirta [kg/s]
N	Nippikuorma [N]
P	Teho [W]
p_K	Kammiopaine [bar]
p_L	Kuormaletkun paine [bar]
p_T	Tiivistepaine [bar]
Q_K	Kammion virtaus [l/min]
Q_T	Tiivisteiden virtaus [l/min]
R	Kaasuvakio [m ² /s ² K]
r	Säde [m]
T	Paperiradan jännitys [N]
T	Lämpötila [K]
T_{sp}	Kidesulamispiste [°C]
W	Telan kokonaiskuorma [N]
w	Viivakuorma [N/m]
β	Korjauserroin
γ	Adiabaattivakio
δ	Taipuma [mm]
μ	Dynaaminen viskositeetti [Pa·s]
μ_k	Kitkakerroin, liikekitka
ρ	Tiheys [g/cm ³]
σ_T	Vetolujuus [MPa]
σ_x	Keskihajonta
ψ	Virtausfunktio

Lyhenteet

NBR	Nitrile butadiene rubber, nitrilikumi
PBT	Polybutylene terephthalate, polybutyleenitereftalaatti
PC	Polycarbonate, polykarbonaatti
PE	Polyethylene, polyeteeni
PID	Proportional-integrative-derivative -säädin
PMMA	Polymethyl methacrylate, polymetyyliakrylaatti ts. akryyli
POM	Polyoxymethylene, polyoksimetyyli ts. polyasetaali
POM-C	POM-copolymer, sekapolymeerilaatu
PTFE	Polytetrafluoroethylene, polytetrafluorieteeni ts. teflon
PU	Polyurethane, polyuretaani
PVC	Polyvinyl chloride, polyvinylikloridi

Sisältö

Tiivistelmä	ii
Abstract	iii
Alkusanat	iv
Symbolit	v
Lyhenteet	vi
1 Johdanto	1
1.1 Tutkimuksen tausta	1
1.2 Tutkimusongelma	2
1.3 Tutkimuksen tavoite	4
1.4 Tutkimuksen rajaukset	4
1.5 Tutkimusmenetelmät	5
2 Paperikonetelan taipumakompensointi	6
2.1 Suomen paperikoneteollisuuden historiaa lyhyesti	6
2.2 Paperinvalmistuksen perusteita	7
2.3 Mihin taipumakompensointia tarvitaan?	9
2.4 Viivakuorman hallinta	10
2.4.1 Bombeerattu tela	11
2.4.2 Laakerisijoituksen vaikutus	11
2.4.3 Taipumakompensointijärjestelmät	12
2.4.4 Taipumakompensointi paineilmalla	14
2.5 Käytetyt laakerit ja voitelumenetelmät	16
3 Ilmalaakerit	17
3.1 Toimintaperiaate	17
3.2 Nykytilanne	19
3.3 Tulevat käyttökohteet	21
4 Aerostaattisen tiivisteiden suunnittelu	24
4.1 Vaatimuslista	24
4.2 Toimintoanalyysi	25
4.3 Tiivistekonstruktion suunnittelu	27
4.3.1 Tiivistemateriaalin valinta	27
4.3.2 Tiivisteprofiili ja painejakauman hallinta	31
4.3.3 Ilmakuristusten valmistus	35
4.3.4 Tiivisteiden kuorman säätö	36
4.4 Tiiviste osana taipumakompensoitua telaa	37
4.4.1 Taipuman vaikutus	37
4.4.2 Tiivisteiden ripustus	38

5	Koelaitteiston kuvaus	40
5.1	Koelaakerin mäntätyyppinen aerostaattinen tiiviste	40
5.2	Mittausjärjestelmä	46
5.2.1	Testipenkki	46
5.2.2	Käytetyt anturit ja toimilaitteet	47
5.2.3	Mittausmalli	49
5.2.4	Suoritetut mittaukset	51
6	Mittaustulokset	54
6.1	Kuormitusletku	54
6.2	Tiiviste ilmalaakerina	56
6.3	Koelaakerin kokonaistoiminta	59
6.4	Askelvastemittaukset	65
7	Tulosten pohdinta	67
7.1	Kuormitusletkun toiminta	67
7.2	Aerostaattisen tiivisteiden ominaisuudet	68
7.3	Koelaakerin toiminnan kokonaisarviointi	70
7.4	Koelaakerin dynamiikka	74
8	Johtopäätökset	77
	Lähdeluettelo	79

Luku 1

Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Painopaperin menekki on laskussa tietoliikenneyhteyksien kehittyessä ja mobiililaitteiden kaventaessa perinteisen painetun median osuutta kaikesta tiedonvälityksestä. Paperin ja kartongin valmistukseen käytettäviä koneita tullaan tarvitsemaan kuitenkin vielä pitkälle tulevaisuuteen. Pakkauskartongin kysyntä on maailmanlaajuisesti nousussa. Niin ikään maailman nopeasti kehittyvissä talouksissa myös hygieniatuotteiden kysyntä on kasvussa. (Riala et al. 2015: 20)

Eräs teollisuutemme tukipilareista, paperi- ja kartonkikoneiden suunnittelu, valmistus ja huoltotoiminta on yhä tärkeä kilpailukykyämme ylläpitävä tekijä. Tämän osuus kaikesta viennistä on ollut jälleen lievässä nousussa viime vuosina (Tulli 2016). Näiden koneiden luotettavuuden, prosessikelpoisuuden ja energiatehokkuuden kehittäminen varmistaa pysymisemme kilpailun kärjen tuntumassa, vaikka varsinaisen paperinvalmistuksen painopiste onkin siirtymässä nopeasti kehittyville markkina-alueille (Riala et al. 2015: 21).

Paperinvalmistusprosessissa käytettävien telojen valmistus suurella mittatarkkuudella ja korkealla materiaaliteknisellä osaamisella eivät yksinään riitä varmistamaan paperin tasalaatuisuutta tuotantoprosessissa. Paperiin kohdistuvan viivakuorman on oltava mahdollisimman tasainen. Erityisesti raskaan kuormituksen alaisena olevien telojen taipuma on kompensoitava, jotta epätasainen viivakuorma ei aiheuttaisi paperin laatuvaihtelua. (Roisum 1996: 29)

Taipumakompensointia tarvitaan myös kartonkikoneissa, jotka eroavat paperikoneista periaatteellisesti pääasiassa lopputuotteen neliömassan perusteella. Raja paperin ja kartongin välillä on epämääräinen. Siinä missä paperin neliömassa vaihtelee välillä 35...300 g/m², kartongin tyypillinen neliömassa voi olla 150...930 g/m² (Pyroll 2016). Määritelmä perustuu pääasiassa lopputuotteen käyttötarkoitukseen. Kartongit valmistetaan monikerrostekniikalla, ja tyypillisesti kartonkikoneiden telat ovat paperikoneita kapeampia, joten kartonkikoneiden telojen vaatimukset taipumakompensoinnin osalta eivät merkittävästi eroa paperikoneista (Valmet 2016).

Suurien tuotantovolyyymien paperilajeissa kuten sanomalehti- ja aikakauslehtipapereissa rainan leveys on yli kahdeksan metriä. Ratanopeus vaihtelee välillä 1000...1300 m/min. Erikois- ja hienopaperien valmistuksessa koneet ovat kapeampia ja hitaampia. Rainan leveys on kolmesta kahdeksaan metriä ja ratanopeudet vaihtelevat välillä 400...1100 m/min.

Kartonkikoneiden rainan leveys on tyypillisesti kolmesta kuuteen metriä, mutta voi olla yli yhdeksänkin metriä. Nopeudet ovat 300...900 m/min. (KnowPap 2016)

Paperikonetelojen taipumakompensointiin on kehitetty useita järjestelmiä, joista tuotantokäytössä olevat järjestelmät perustuvat pääasiassa hydraulijölyn painevaikutukseen. Näiden järjestelmien haittapuolina ovat suuri energiankulutus ja verraten suuret valmistuskustannukset. Jos taipumakompensointi pystyttäisiin varmistamaan hydraulijölyn sijaan paineilmalla, oletettavasti näiden järjestelmien energiatehokkuus paranisi. Öljytelojen suuri energiankulutus johtuu osaltaan öljyn korkeasta viskositeetista. Paineilman käyttö vähentäisi häviöitä merkittävästi erittäin alhaisen viskositeetin ansiosta. Tämä edellyttäisi sitä, että vuotohäviöistä ei muodostuisi liian suuria.

Tämän työn tarkoituksena oli tutkia mahdollisuutta soveltaa aerostaattista tiivistystä paperikonetelan taipumakompensoinnissa. Tavoitteena oli selvittää, mitä erityispiirteitä sen konstruktion osana paineilmakäyttöistä taipumakompensointijärjestelmää liittyy sekä arvioida tällaisen järjestelmän energiankulutusta.

1.2 Tutkimusongelma

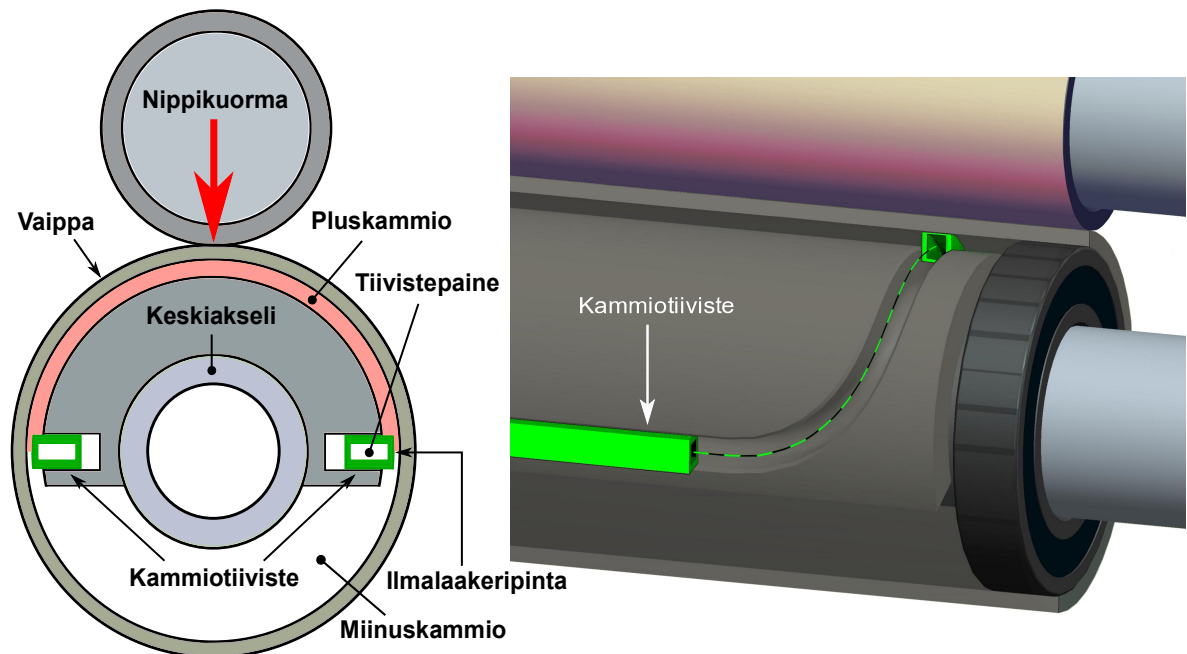
Pyörivän telan taipumakompensointi paineilmalla käytännössä edellyttää aerostaattisten tai aerodynaamisten tiivisteiden soveltamista. Tiivisteet tarvitaan, jotta paineilmankulutus ei kasva liian suureksi, ja hankaavat tiivisteet eivät oletetusti tule kyseeseen, koska voiteleva väliaine puuttuu ja paperikoneiden suunniteltu käyttöikä voi olla jopa useita kymmeniä vuosia (Roisum 1996: 108–109).

Aerostaattisella tiivisteellä tarkoitetaan tiivistettä, joka on samanaikaisesti sekä aerostaattinen laakeri että tiiviste. Voiteluaineena niissä toimii ilma. Niiden soveltaminen nojaa ilmalaakerien teoriaan ja aiempaan tutkimustietoon, jota kuitenkin aerostaattisista tiivisteistä on vain hyvin vähän. Tutkimuksia on tehty pääasiassa ilmalaakereilla, joiden tarkoituksena on korvata perinteiset vierintä- ja liukulaakerit. Tiivistekonseptin suunnittelussa aiemmasta tutkimustiedosta on apua, mutta lähestymistapaa ongelmaan on syytä edelleen kehittää.

Tavalliset ilmalaakerit suunnitellaan kantamaan suuriakin ulkoisia kuormia. Aerostaattisen tiivisteiden tarvitsee kantaa vain tiivistykseen liittyviä kuormia. Aerostaattiseen tiivistykseen perustuvan laakerikokonaisuuden kuormankantokyky määräytyy pääasiassa kammiopaineen perusteella, ja tiivistyksen täytyy kantaa kuormaa sen verran kuin kammiopaine ja sen tuottamat voimavaikutukset edellyttävät.

Aerostaattisia tiivistereunoja voidaan hyödyntää paperikoneen telan vaipan sisäpuolella erottelemaan taipumakompensoinnin edellyttämä paineistettu ilmakammio paineistamattomasta. Kuvassa 1.1 on havainnollistettu aerostaattisen tiivistyksen osuutta paineilmakäytöisessä taipumakompensoinnissa. Pluskammion paine säädetään vastaamaan nippikuor-

maa, mikä kompensoi taipuman. Tiiviste toimii pyörivän vaipan sisäpinnalla ilmalaakerina. Mitä ohuempi ilmakalvo tiivisteiden ja vaipan väliin saadaan aikaiseksi, sitä tiiviimpi pluskammiosta tulee, ja sitä vähäisemmäksi sen ilmankulutus muodostuu.



Kuva 1.1: Paineilmakäyttöisen taipumakompensoinnin periaate. Pluskammiosta paineistetaan ja eristetään aerostaattisin tiivistein miinuskammioista, josta on huuhotus ulkoilmaan. Tiivisteiden ripustus on kiinnitetty pyörimättömään keskiakseliin.

Huokoisesta materiaalista valmistetut ilmalaakerit eivät tarvitse tiivisteitä, mutta ovat kaltevia erikoistuotteita (New Way Air Bearings 2016). Joihinkin käyttötarkoituksiin ilmakammioilla varustetut tiivistereunalliset laakerit voivat olla käyttökelpoinen ratkaisu. Kammiollisen tiivistereunallisen laakerin stabiliteetti ja etenkin jäykkyys ovat pääsääntöisesti kuormankantokyvyltään vastaavaa kammiotonta laakeria heikompia, koska ylimääräisen kammiotilavuuden vuoksi ilman kokoonpuristuvuudella on suurempi vaikutus.

Koska tiedossa ei ole, että aerostaattisella tiivisteellä varustettuja teloja olisi tuotantokäytössä, tällaisten erikoistiivisteiden soveltuvuutta pyörivän telan tiivistämiseen ei tunneta. Ei tunneta myöskään sitä, minkälainen tiivistekonsepti olisi tähän käyttötarkoitukseen paras mahdollinen. Aerostaattisten tiivisteiden soveltamisesta telan taipumakompensointiin ei ole kokemusta. Kivelä (2013) on tutkinut tiivistereunan lisäämistä ilmalaakeriin tavoitteena vähentää laakerin ilmankulutusta. Tutkimuksessa ilmankulutuksen vähenemisestä ei saatu näyttöä, mutta samalla ilmamäärällä kammiotoman alumiinitiiivistelaakerin kuormankantokykyä pystyttiin parantamaan tiivistepainetta säätämällä.

1.3 Tutkimuksen tavoite

Tutkimuksen päätavoitteena oli suunnitella aerostaattisella tiivisteellä varustettu ilmakammioellinen laakeri. Aerostaattisten tiivisteiden osalta tavoitteena oli tuottaa tietoa, jota voitaisiin hyödyntää paineilmalla taipumakompensoidun telan kammioitiivisteiden suunnittelussa. Käyttämällä paineilmaa taipumakompensoinnissa voitaisiin telojen nestekitkahäviöt pienentää murto-osaan nykyisestään ja siten parantaa paperinvalmistusprosessin energiatehokkuutta jo käytössä oleviin taipumakompensointijärjestelmiin perustuviin tuotantoprosesseihin verrattuna.

Koelaakeriin piti kehittää käyttökelpoinen ja tarkoituksenmukainen aerostaattinen tiiviste-konsepti, jonka ilmankulutus olisi kohtuullisella tasolla, sillä liian suuret vuotohäviöt todennäköisesti estäisivät energiatehokkuuden paranemisen. Tämän jälkeen voitaisiin suorittaa ilmankulutusmittaukset ja arvioida hypoteettisen paineilmalla taipumakompensoidun telan ilmankulutusta aerostaattisilla koetiivisteillä suoritettujen kulutusmittausten pohjalta.

1.4 Tutkimuksen rajaukset

Tutkimuksen painopisteeksi valittiin ilmakammioiden käyttäminen telan taipumakompensointiin ja niin sanottujen plus- ja miinuskammioiden erottamiseen soveltuvien tiiviste-laakerien tutkiminen. Paineilman käyttö taipumakompensoinnissa antaa jonkin verran liikumavaraa ja vaihtoehtoja koelaitteiston konstruktion suunnitteluun. Taipumakompensointi olisi mahdollista toteuttaa käyttämällä huokoisia ilmalaakereita kuormituskenkinä (ks. kuva 2.9, luku 2.4.3). Tämä ratkaisu vaatisi suurta mittatarkkuutta telan vaipan sisäpinnalta. Niin ikään mittatarkat huokoisesta materiaalista valmistetut kaupalliset ilmalaakerit ovat verraten kalliita (New Way Air Bearings 2016).

Kun energiatehokkuuden näkökulmasta ilmankulutus halutaan pitää riittävän alhaisella tasolla, paineilmalla ei käytännössä voida saavuttaa hydraulioöljyyn perustuvia sovelluksia vastaavia painetasoja. Jos kuormituskengän pinta toimisi ilmalaakerina, kuormituskenkien yhteinen ilmanpainetta vastaava projektiopinta-ala ei riittäisi tuottamaan taipumakompensoinnissa vaadittuja voimia. Näin ollen tutkimus rajattiin koskemaan tiivisteiden suunnittelua ilmakammion avulla tapahtuvaan taipumakompensointiin. Tämä ei sinänsä sulje pois mahdollisuutta käyttää huokoisia laakereita osana kammioitiivistettä.

Myös telan päätylaakeroinnissa olisi teoriassa mahdollista käyttää ilmalaakereita. Telojen laakeroinnin osuus kaikesta tehohäviöstä paperikoneissa on hyvin pientä (Holmberg et al. 2012). Siksi ilmalaakereiden käytöllä päätylaakeroinnissa ei saavutettaisi merkittävää hyötyä eikä tässä työssä perehdytä ilmalaakereihin päätylaakeroinnin vaatimusten näkökulmasta.

1.5 Tutkimusmenetelmät

Päättävöitten saavuttamiseksi käytettiin kokeellisia menetelmiä. Aerostaattisen tiivisteen toiminnan selvittämiseksi työssä valmistettiin tasomainen ilmakammioellinen laakeri. Siinä aerostaattisena tiivisteenä toimi POM-muovista koneistettu pinta, johon laserporattiin ilmakuristuksia tasaisin välein koko jakoympyrälle. Tiivisteen kuormaa säädettiin paineilma-käyttöisellä kuormitusletkulla.

Valmistetun koelaakerin avulla testattiin laserrei'itetyn pinnan toimintaa aerostaattisena tiivisteenä ja kuormitusletkun toimintaa kyseisen tiivisteen kuorman säätämiseen erotukse-na koko laakerin kuormasta. Kammiopaine, tiivisteen syöttöpaine ja kuormaletkun paine olivat erikseen säädettäviä. Tavoitteena oli, että koelaakeri olisi verrannollinen ideaaliin tapaukseen ilmakammion eristämisessä aerostaattisten tiivisteiden avulla. Tasomaisella laa-kerilla mitatun ilmarkulutuksen oli tarkoitus määrittää vertailuarvo tiivisteiden soveltami- sessa taipumakompensoituun telaan, jossa tiivisteen ilmaraon hallinta olisi kertaluokkaa haasteellisempi tehtävä.

Parhaimmalla mahdollisella tavalla onnistuessaan hypoteettisen telatoteutuksen ilmarkulu- tus tiivistemetriä kohti olisi samaa suuruusluokkaa tai jopa alhaisempi kuin kokeessa käytetyn tasomaisen laakerin ilmarkulutus. Tätä paineilman avulla taipumakompensoidun telan energiankulutusta vastaavaa kulutusta olisi mahdollista verrata jo käytössä olevien taipumakompensointijärjestelmien energiankulutukseen.

Luku 2

Paperikonetelan taipumakompensointi

Tässä luvussa käydään läpi Suomen paperikoneteollisuuden sekä alan tärkeän vaikuttajan, Valmet Paperin historiaa lyhyesti. Paperinvalmistuksen perusteet käydään läpi yleisellä tasolla, ei kemian- eikä prosessitekniikkaan syventyen. Paperikoneen ja sen telojen toiminta esitellään pääpiirteittäin. Lisäksi selvitetään, mihin taipumakompensointia tarvitaan paperikoneissa ja esitellään lyhyesti telan taipumakompensoinnissa yleisesti käytössä olevia menetelmiä.

2.1 Suomen paperikoneteollisuuden historiaa lyhyesti

Suomalaisen paperikoneteollisuuden juuret juontavat kahteen tekijään. Ensinnäkin siihen, että Suomessa on paljon metsää, josta saadaan paperinvalmistuksen raaka-ainetta. Toiseksi siihen, että Suomessa on kansainväliselläkin mittapuulla korkeatasoinen metalliteollisuus yhdistettynä vähintäänkin kohtuulliseen koulutustasoon.

Pitkälle 1960-luvulle Suomessa oli neljä paperikonevalmistajaa: A. Ahlström Karhulassa, Tampella Tampereella, Valmet Rautpohjassa Jyväskylässä ja Wärtsilä Sörnäisissä Helsingissä. Monien omistajanvaihdosten ja fuusioiden jälkeen Valmetista tuli Suomen ainoa ja yksi maailman suurimmista paperikonevalmistajista.

Valmetin Paperit-liiketoimintalinjan asiakkaita ovat kartonki-, pehmopaperi- ja paperiteollisuus. Koko organisaation tuotantohistorian kirjo on laaja aina tykeistä lentokoneisiin ja traktoreista kiskokalustoon. Yhtiön juuret ulottuvat 1750-luvulle, jolloin nykyisessä Suomenlinnassa toimi pieni allastelakka (Björklund 1990: 13). Se päättyi 1900-luvun alussa valtion omistukseen ja osaksi Valmetia.

Suomen metalliteollisuus toimitti Venäjän armeijalle pääasiassa tykistön ammusten kuoria ja sytyttimen osia Venäjän-Japanin sodan aikana vuosina 1904-05 ja ensimmäisen maailmansodan aikana. Puolustusvoimien aseistus koostui itsenäisyyden alkuaikoina pääasiassa käytetystä, muiden muassa Saksasta ja Ranskasta hankitusta kalustosta. (Jokinen 1988: 18)

Jokisen (1988: 18) mukaan Sotaministeriön taisteluvälineosasto arvioi jo toimintansa alussa vuonna 1918, että puolustusvalmiuden saattaminen tyydyttävälle tasolle oli mahdollista vain riittävän monipuolisella kotimaisella tuotannolla. Tärkeimmiksi tuotteiksi arvioitiin aseet ja ampumatarvikkeet. Taisteluvälineosaston vuoden 1921 ehdotuksen seurauksena Valtion Kivääritehdas aloitti toimintansa Jyväskylän Tourulassa 1926, mutta Rautpohjan tehdas antoi odottaa itseään vielä muutaman vuoden, kunnes aloitti toimintansa ensin Valtion Tykkitehtaan nimellä 1938. Asetuotanto lopetettiin sodan jälkeen, mutta vielä

1960-luvulla tehdas valmisti puolustusvoimille raskaita sinkoja. Tykkien valmistus tehtaalla lopetettiin 1944, ja tehdas liitettiin osaksi Valtion Metallitehtaita 1946. Vielä samana vuonna tehtaan nimeksi tuli Valmetin Metallitehtaat, Rautpohjan Tehdas, ja vuonna 1951 Valmet Rautpohjan Tehdas. (Jokinen 1988: 96)

Valmet Rautpohjan tehdas toimitti ensimmäisen paperikoneensa 1953. Kansainvälisesti merkittäväksi paperikoneiden valmistajaksi Valmet nousi 1960-luvulla (Björklund 1990: 195). 1980- ja 1990-luvulla Valmet keskittyi yhä enemmän paperikoneiden valmistukseen ja suunnitteluun liittyvään teknologiaan. Valmet luopui laivanrakennuksesta sekä kiskokaluston, hissien ja traktoreiden valmistuksesta. Valmet osti Wärtsilän Järvenpään tehtaan, ruotsalaisen Karlstads Mekaniska Werkstadin ja kartonkikoneita valmistavan Tampella Papertechin (Valmet 2016).

Metso Oy syntyi Valmetin ja Rauma Oy:n yhdistyessä vuonna 1999. Fuusion seurauksena syntyi maailmanlaajuisesti toimiva prosessi- ja automaatioteollisuuden laitetoimittaja. Vuonna 2013 yhtiö jakaantui Metsoksi ja Valmetiksi, joista jälkimmäinen on edelleen tänä päivänä yksi maailman johtavista paperikoneliiketoiminnan yrityksistä. Tammikuussa 2015 Valmet Oyj osti Metso Oyj:ltä Prosessiautomaatiojärjestelmät-liiketoiminnan, josta tuli Valmetin neljäs liiketoimintalinja. (Valmet 2016)

2.2 Paperinvalmistuksen perusteita

Paperinvalmistuksen tärkein raaka-aine on puu. Ennen kuin puuainees soveltuu paperikoneen käsiteltäväksi, se pitää hakettaa ja keittää selluksi. Tuloksena saatavasta massasta pestään pois paperinvalmistuksen kannalta haitallisia aineita, kuten esimerkiksi ligniiniä. Ruskeisiin pahvilaatuihin näitä voidaan jättää. Pesun jälkeen massa valkaistaan.

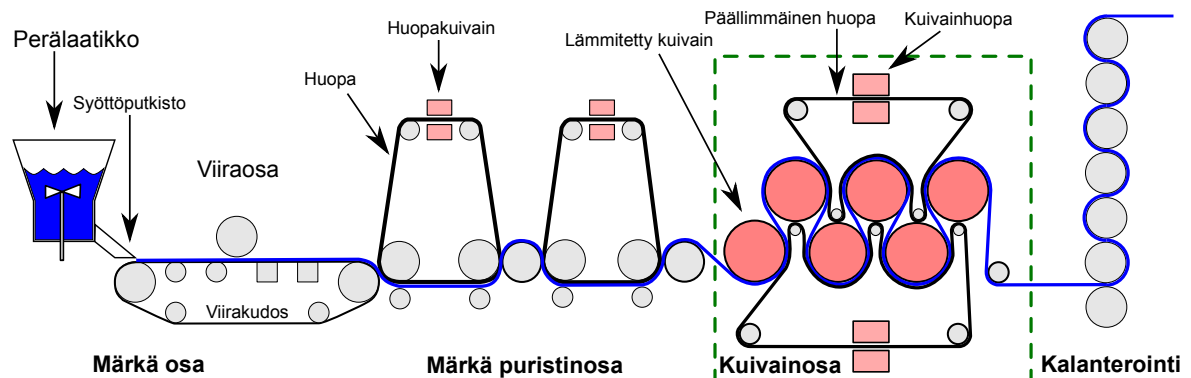
Tämän jälkeen massaa edelleen käsitellään niin, että selluloosakuidut erottuvat toisistaan, jolloin kuitujen on mahdollista asettua rainalla toivottuun suuntaan. Lisäaineistuksella vaikutetaan mm. kiiltoon, värisävyyn ja painomusteen imukykyyn. Prosessin tuloksena syntyy raakapaperimassaa, joka soveltuu paperikoneen jatkokäsiteltäväksi. (Biermann 1996)

Biermannin mukaan paperinvalmistuksen päävaiheet yllä kuvatun massanvalmistuksen lisäksi ovat:

1. Vesipitoisen paperimassan syöttö paperikoneen perälaatikkoon haluttua neliöpainoa vastaavaksi,
2. Massan muotoilu paperikoneen viiralla paperirainaksi, jossa poistuu osa vedestä,
3. Paperiradan syöttö paperikoneen puristinosalle, jossa edelleen poistuu vettä,
4. Paperin kuivatus ilmapirran tai kuumen pinnan avulla.

Paperin tullessa viiralta ensimmäiselle telapuristimelle viivakuorma on luokkaa 40...50 kN/m. Toisella telapuristimella kuormaa kasvatetaan tasolle 60...70 kN/m. Kolmannella telapuristimella viivakuorma on tyypillisesti 80...120 kN/m. Päävaiheiden jälkeen paperi voidaan kiillottaa ja päällystää. Tämän jälkeen paperi pakataan ns. konerulliksi, jotka voivat painaa useita kymmeniä tonneja. Konerullia voidaan siirtää edelleen jälkikäsittelyyn esimerkiksi päällystykseen, superkalanterointiin ja pituusleikkaukseen. Konerullat leikataan pienemmiksi asiakasrulliksi pituusleikkurissa. Rullat pakataan tai arkitetaan arkitusko-
neessa. (KnowPap 2016)

Paperinvalmistuksen päävaiheita vastaavat keskeisimmät paperikoneen osat ovat perälaa-
tikko, viiraosa, puristinosa ja kuivatusosa (Kuva 2.1). Nämä kaikki sisältävät lukuisia telo-
ja mukaan lukien paperiradan ohjaustelat sekä kuivatusosan imutelat ja muut erikoistelat.
Taipumakompensoinnin kannalta kiinnostavin osa on puristinosa, jossa käytetään monia
erilaisia teloja. Näitä ovat mm. kivitelat, kenkätelat, uratelat ja taipumakompensoidut telat.
(KnowPap 2016)

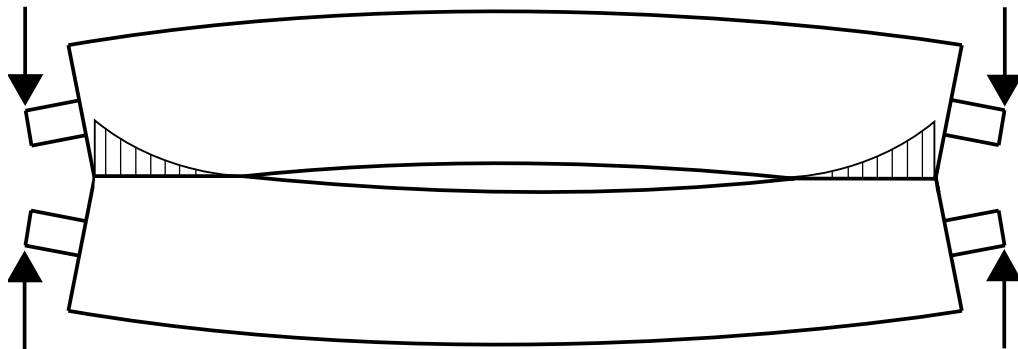


Kuva 2.1: Paperikoneen keskeisimmät osat.

Kiillotuksessa, päällystyksessä ja jälkikäsittelyn superkalanteroinnissakin esiintyy suuria
nippikuormia. Taipumakompensoinnin merkitys on näissä vaiheissa käytettävissä teloissa
kuitenkin puristinosan teloja vähäisempi. Multinippikalantereissa useiden telojen päälle-
käinen asettelu vähentää tarvetta telojen sisäiselle taipumakompensointilaitteistolle, onhan
tämä pinoittain asettelu jo itsessään eräänlainen taipumakompensointi. Pehmeässä eli ns.
soft-kalanteroinnissa puolestaan ei ole tarkoituskaan saada aikaiseksi mahdollisimman
tasapaksuista paperia, vaan poistaa lopputuotteen karheutta. Pehmeänippisiä kalantereita
käytetään pääasiassa sanomalehtipaperin tuotannossa. (KnowPap 2016)

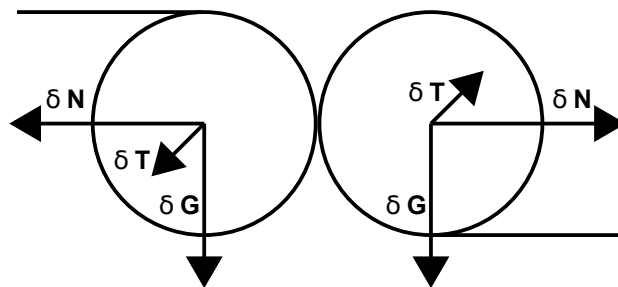
2.3 Mihin taipumakompensointia tarvitaan?

Puristinosalla ja kalanteriosalla telojen paperiin kohdistaman viivakuorman pitää olla mahdollisimman tasainen, sillä muuten valmistusprosessin tuloksena syntyvän paperin paksuus saattaa poiketa tavoitellusta vaihteluvälistä. Jos prosessin kannalta kriittisten nippitelojen taipumaa ei kompensoida lainkaan, telojen väliin saattaa jäädä katvealueita (Kuva 2.2), joissa paperirataan ei kohdistu lainkaan puristusta. Tällaiset katveet saattavat pahimmillaan rypistää tai repiä paperin (Roisum 1996: 29). Pinnoitetuilla, ns. pehmeillä teloilla viivakuormat vaihtelevat välillä 5...80 kN/m, ja kovilla teloilla kalanteroinnissa viivakuormat voivat olla useita satoja kilonewtoneita metriä kohti (Valmet 2016).



Kuva 2.2: Epätasainen viivakuorma ja välys telojen keskellä. (Roisum 1996)

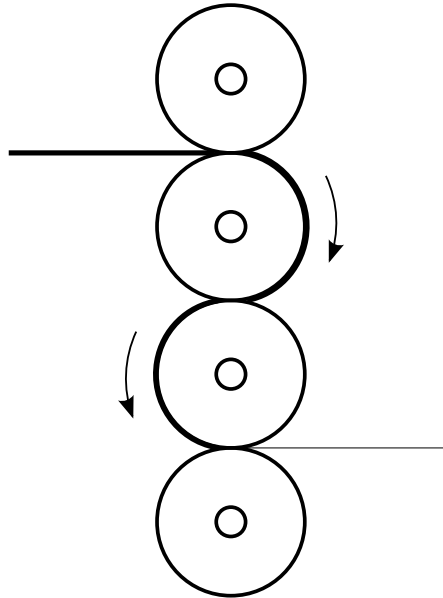
Taipumaan vaikuttaa pääasiassa kolme eri voimaa, jotka on esitetty kuvassa 2.3 (Roisum 1996: 29). Voimat aiheutuvat telan massasta (G), paperin tai muun rullattavan materiaalin jännityksestä (T) ja nippikuormasta (N). Paperinvalmistusprosessissa rullattavan materiaalin jännityksestä aiheutuva kuorma on kaikkein pienin. Nippikuorman aiheuttama taipuma on kompensoitava välyksen estämiseksi. Roisumin (1996) mukaan nippitelat tai ainakin toinen teloista voidaan pinnoittaa elastisella materiaalilla, sillä taipumakompensoinnista huolimatta viivakuormassa voi olla epätasaisuuksia.



Kuva 2.3: Telan taipumaan vaikuttavat voimat. (Roisum 1996)

Kalanteroinnissa telat ovat usein kuvasta 2.3 poiketen pystysuoralla akselilla päällekkäin, jolloin paperiradan jännityksestä ei aiheudu voimaa, jos päällekkäisiä teloja on vain kaksi. Telojen nippikuormasta aiheutuva voimavektori alemmassa telassa osoittaa samaan suun-

taan kuin telojen painon aiheuttama voimavektori. Taipuman kompensointi voi siten tapahtua aina samaan suuntaan, ja vain kompensoinnin suuruutta pitää vaihdella nippikuorman suuruutta vastaavasti. Valmetilla on tuotannossa kalantereita, joissa voi olla jopa kymmenen telaa päällekkäin (Valmet 2016). Toimintaperiaate on kuvan 2.4 mukainen.



Kuva 2.4: Kalanteroinnissa paperirata voi kulkea useiden päällekkäisten telojen läpi. (Valmet 2016)

2.4 Viivakuorman hallinta

Viivakuorman riittävästä tasaisuudesta voidaan huolehtia kolmella periaatteellisella tavalla, ja käytännön toteutus on usein näiden menetelmien yhdistelmä:

1. Telan elastisella pinnoitteella,
2. Telan geometrialla tai optimaalisella laakerisijoituksella,
3. Erillisellä taipumakompensointilaitteistolla.

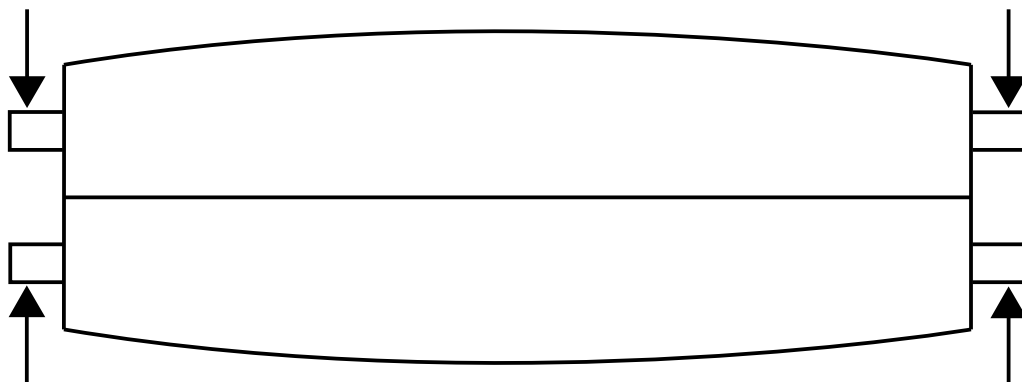
Elastinen pinnoite tasaa jännityshuippuja ja täyttää viivakuorman katvealueita, mutta sitä ei voida käyttää kaikkein raskaimman kuormituksen teloissa. Tällaiset telat pinnoitetaan keraamisella pinnoitteella hyvän abrasiivisen kulumisenkeston aikaansaamiseksi. Alumiinisilla teloilla anodisointi on luonnollinen pinnoitusmenetelmä, sillä alumiinioksidin (Al_2O_3) kovuus lähentelee timantin kovuutta. Paperikoneiden teräksisissä teloissa suositaan wolframikarbidipinnoitteita (WC , W_2C , W_3C tai W_3C_4). (Roisum 1996): 113, 122)

Kun elastista pinnoitetta ei voida käyttää, erillisen taipumakompensointijärjestelmän merkitys korostuu entisestään. Jos puolestaan elastinen pinnoite soveltuu käyttökohteeseen, pinnoitemateriaaleina suositaan muiden muassa luonnonkumia, butyyli- tai nitrilikumia, akryyliä, silikonია ja polyuretaania. (Roisum 1996: 122)

Kaikkia tunnettuja menetelmiä taipumakompensointiin ei tässä työssä esitellä, koska osa niistä soveltuu huonosti paperi- ja kartonkikoneiden teloihin. Esimerkkinä mainittakoon taipuman kompensointi telan päätyihin tuodulla taivutusmomentilla. Tällä menetelmällä ei pystytä kompensoimaan kiinteäakselisen erillisellä vaipalla varustetun telan taipumaa.

2.4.1 Bombeerattu tela

Viivakuorman tasaisuus voidaan varmistaa koneistamalla tela tynnyrimäiseksi (Kuva 2.5). Valmistustapaa kutsutaan bombeeraukseksi. Tällaisen telan etuna on täysin tasainen viivakuorma vakiokuormituksella. Ongelmana on se, että suunniteltua pienemmällä nippikuormalla telojen kosketus tapahtuu vain keskeltä. Suunniteltua suuremmalla nippikuormalla bombeerattujen telojen keskelle jää vällys. Lisäksi ongelmana on ratanopeuden epätasainen jakauma telalla. Tämä saattaa aiheuttaa virheitä prosessoitavaan materiaaliin. (Roisum 1996: 82)

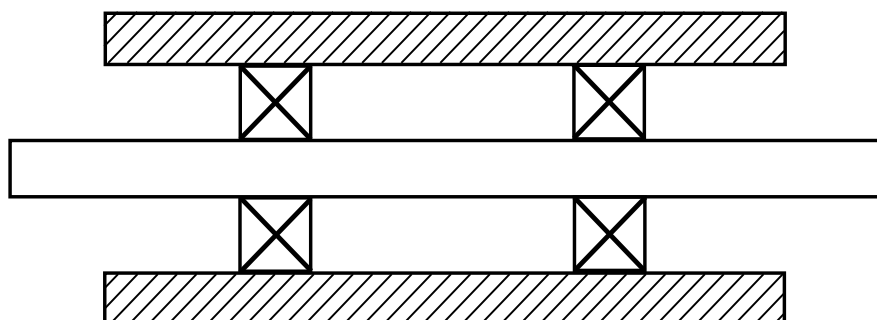


Kuva 2.5: Tynnyrimäisillä teloilla viivakuorma on tasainen vakiokuormalla. (Roisum 1996)

Patenttihakemuksessa (Hakola 2009) on kuvattu menetelmä telan vaipan ja sen sisällä olevan apuvaipan liittämiseksi toisiinsa. Apuvaippa sisältää öljyllä tai ilmalla paineistettavan kammion. Jos sisempi apuvaippa bombeerataan ja telan liitoksesta akseliin tehdään joustava, telasta tulee näin taipumakompensoitu. Koska ulkovaipan halkaisija on aksiaalisuunnassa vakio, bombeeraukselle tyypillistä vaipan ratanopeuden vaihtelua ei synny.

2.4.2 Laakerisijoituksen vaikutus

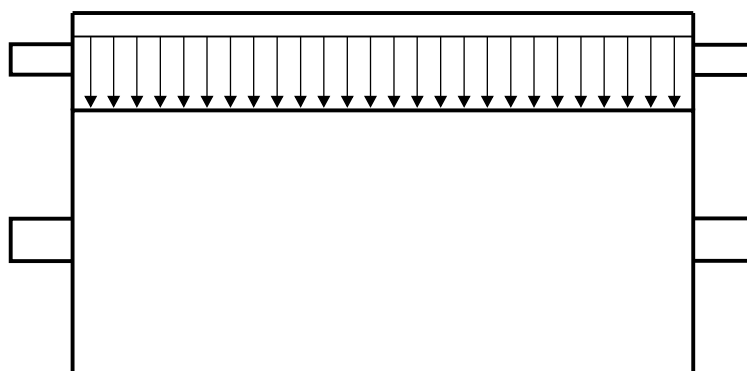
Optimaalisella laakerien sijoituksella (Kuva 2.6) saavutetaan pienin suhteellinen taipuma ilman taipumakompensointia tai tynnyrimäisiä teloja. Viivakuormasta ei tällä konstruktiolla synny tasaista, mutta jännityshuiput ovat merkittävästi pienemmät kuin sijoittamalla laakerit telan päihin. (Roisum 1996: 83)



Kuva 2.6: Optimaalisella laakerien sijoituksella voidaan pienentää taipuman maksimia. (Roisum 1996)

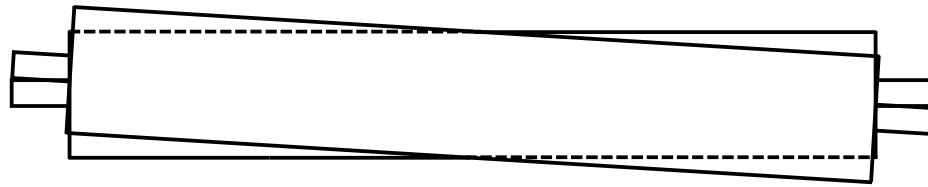
2.4.3 Taipumakompensointijärjestelmät

Roisumin (1996: 84) mukaan kaikkein yksinkertaisin menetelmä taipumakompensointiin on kaksi päällekkäin sijoitettua halkaisijaltaan eri suuruista telaa. Suurempi ja jäykempi tela on sijoitettu alapuolelle. Halkaisijaltaan ohut, taipuisa tela, jonka massa on kuitenkin verraten suuri, on sijoitettu yläpuolelle. Viivakuorma syntyy pääasiassa ylemmän telan painosta. Menetelmän periaate on esitetty kuvassa 2.7.



Kuva 2.7: Halkaisijaltaan erisuuruiset telat ovat yksinkertaisin menetelmä taipumakompensointiin.

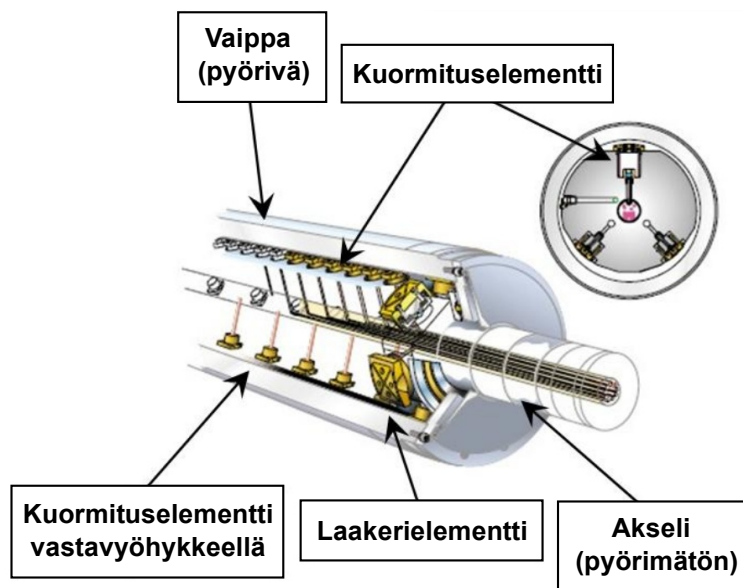
Niin ikään telojen vinolla sijoituksella (Kuva 2.8) on periaatteessa erittäin yksinkertaista hallita viivakuormaa. Menetelmän avulla osa viivakuorman jakaumasta siirtyy telojen päistä kesemmälle telaa. Roisumin (1996: 84) mukaan käytännön ongelmana menetelmässä on se, että osaamattomissa käsissä viivakuorma saattaa muuttua entistäkin epämääräisemmäksi ja aiheuttaa enemmän vahinkoa kuin hyötyä.



Kuva 2.8. Telojen vino aseointi siirtää kuormaa telojen päistä keskelle. (Roisum 1996)

Yllä kuvattuja käytäntöjä monimutkaisempi menetelmä ovat rullat, tukilaakerit tai ylimääräiset telat tuottamassa kompensoinnin tarvitseman voiman. Nämä vievät paljon tilaa ja saattavat vaurioittaa kalanteritelan pintaa. Elegantimpaa on sijoittaa taipumakompensointijärjestelmä telan sisälle. Paperikoneissa suuret kalanteritelat koostuvat kiinteästä akselistä ja pyörivästä vaipasta. Telan sisälle jääkin tilaa taipumakompensointimekanismille.

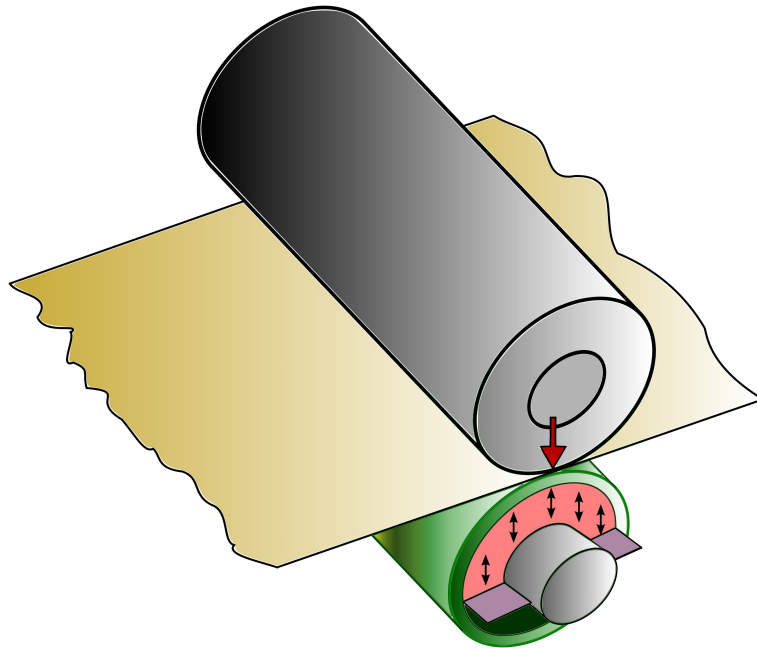
Yleinen käytetty menetelmä taipumakompensointiin, jota Valmetin teloissakin käytetään, ovat vaipan sisälle sijoitetut hydrauliset kuormituskengät. Näitä on yleensä useampia kappaleita telan sisällä tasaisesti viivakuorman pituudelle jaettuna. Kompensoinnin suuruutta hallitaan hydrauliöljyn paineella. Periaate on esitetty kuvassa 2.9.



Kuva 2.9: Hydrauliset kuormituselementit telan vaipan sisäpintaa vasten. (Valmet 2016)

Taipumakompensointi voidaan toteuttaa sähkömagneettisesti. Etuna käytössä oleviin taipumakompensointijärjestelmiin verrattuna olisi nopea vasteaika kuormanmuutoksiin reagointiin ja vähäinen hydrauliöljyn tarve tai teoriassa täysi öljyttömyys. Menetelmä on kuvattu patenttihakemuksessa (Riihinen 1977). Tiedossa ei ole, että tämä menetelmä olisi koskaan ollut tuotantokäytössä.

Yleisessä käytössä oleva taipumakompensointijärjestelmä on niin sanottu uiva tela (Kuva 2.10), jota kutsutaan myös keksijänsä Eduard Küstersin mukaan Küsters-telaksi. Menetelmässä tela on jaettu tiivisteillä kahteen puolikkaaseen, joista toinen kammio on paineistettu hydrauliöljyllä. Paineistettua kammiota kutsutaan pluskammioiksi ja paineistamatonta kammiota miinuskammioiksi. Taipuma kompensoidaan tuottamalla öljynpaineen hydrostaattisella vaikutuksella viivakuorman suuruinen vastakkaissuuntainen voima. (Andritz Küsters 2016)



Kuva 2.10: Uivan telan periaatepiirros. Punaisella merkitty alue kuvaa hydrauliöljyn painevaikutusta pluskammiossa ja nuolet voimavaikutuksen pystysuuntaista komponenttia.

2.4.4 Taipumakompensointi paineilmalla

Küsters-telan ongelmana on se, että öljyn viskositeetin ja vaipan pyörimisen seurauksena pluskammiossa oleva öljy kehittää lämpöä. Hydraulisilla kuormituskengillä varustetut telat ovat energiatehokkaampia (Valmet 2016). Kuitenkin näissä molemmissa ratkaisuissa tiivistysongelmien vuoksi myös telan alaosaan tai miinuskammioon kertyy öljyä, jota pitää pumpata sieltä pois. Telan ulkopuoliset vuodotkin ovat riski, sillä öljyn ei haluta tahrivan tuotannossa olevaa paperia.

Voith on kehittänyt (Schiel 1994) kenkätelan, jolla sisäisiä vuotoja ja öljyn leikkausjännityksestä aiheutuvia tehohäviöitä voitaisiin merkittävästi vähentää. Patentin kuvauksen mukaan telalla olisi mahdollista käyttää ohuempia öljyjä kuin kenkäteloissa yleensä käytetään. Ohuenkin öljyn viskositeetti on kuitenkin paljon suurempi kuin ilman. Pyörintävastuksesta johtuen hydraulikäyttöisissä teloissa pitää yleensä olla erillinen sähkökäyttö, koska merkittävää vääntömomenttia ei ole järkevää yrittää välittää kalanteroitavan materiaalin kautta.

Öljykuormitteisilla uivilla teloilla on joissakin sovelluksissa ongelmana rajallinen pyörimisnopeus. Tuottovaatimusten kasvaessa pyörimisnopeuden ei haluta rajoittavan paperinvalmistusprosessia (Korolainen 2013). Jättämällä öljyn pois taipumakompensoidun telan sisältä pyörimisnopeuden rajoitteeksi muodostuisi lähinnä teladynamiikka.

Tämä työ perustuu olettamukseen, jonka mukaan hydrauliöljyn korvaaminen paineilmalla eli ilmanpaineen käyttäminen taipumakompensointiin parantaisi telan energiatehokkuutta. Paineilman käyttäminen taipumakompensoinnissa edellyttää joko ilmalaakerien tai uudenlaisten aerostaattisten tiivisteiden soveltamista.

Ongelmaksi oletetusti edelleen jää mahdollisesti Küsters-telaakin hitaampi reagoitokyky kuorman muutoksiin, sillä ilman kokoonpuristuvuus on merkittävästi öljyä suurempaa. Energiatehokkuuden lisäys on kuitenkin tavoittelemisen arvoinen asia. Energiankulutus on paperitehtaan toiseksi suurin kustannuserä (26 %) heti sellun hankintakustannusten (43 %) jälkeen (Valmet 2016).

Paineilman käyttö taipumakompensoinnissa on idea-asteella. Kaupallisia sovelluksia ei ole. Eduard Küsters Maschinenfabrik GmbH on patentoinut (Küsters 1998) ilmatelan, jonka tiivisteissä käytetään nestevoitelua. Plus- ja miinuskammion erottavat pitkittäistiivisteet muodostuvat kahdesta välin päähän toisistaan sovitetusta listasta, jotka on sovitettu kontaktiin vaipan sisäpinnan kanssa. Listojen väliin syötetään voiteluaineena öljyä, joka sekä voitelee tiivisteen että tiivistää plus- ja miinuskammioita erottavat raot.

Patentin kuvauksen mukaan tiivisteen kitkasta aiheutuvan tehohäviön osuus on murto-osa uivien telojen öljyn vatkamisesta aiheutuvaan tehohäviöön verrattuna. Kuitenkin myös patenttihakemuksessa kuvatun konstruktion ongelmana on se, että öljyä pitää poistaa kammiosta. Niin ikään öljyn vaahtoutuminen saattaa aiheuttaa ongelmia. Lukuisat poraukset tekevät rakenteesta monimutkaisen.

New Way Air Bearings (Devitt 2014) on patentoinut huokoiseen materiaaliin perustuvan ilmalaakerina toimivan tiivisteen. Sen toimintaperiaate muistuttaa perinteisten akselitiivisteiden toimintaa, mutta voiteluaineeksi riittäisi öljyn tai rasvan sijaan ilma. Tiiviste sallisi jonkin verran aksiaali-, radiaali- ja kulmavirheitä, mutta patentin kuvauksen perusteella ei ole takeita sen soveltuvuudesta sellaisten geometriamuutosten alaisten vastinpintojen tiivistämiseen, joille paperikoneen tela on alttiina.

Taipumakompensoinnissa vaadittava pluskammion öljyn- tai ilmanpaineen taso riippuu viivakuorman suuruudesta ja telan halkaisijasta. Viivakuorman ollessa 50 kN/m halkaisijaltaan 80 cm telan pluskammiossa tarvitaan noin 0,6 bar paine, jos vaippaa ei ole bombeerattu, ja se on päädyistään laakeroitu. Telan pituudella ei ole painetason suhteen merkitystä silloin, kun viivakuorma ja kompensoinnin suuruus täsmäävät.

2.5 Käytetyt laakerit ja voitelumenetelmät

Suurin telan laakereihin kohdistuva kuorma on nipin aiheuttama radiaalikuorma, joka voi olla huomattavan suuri. Jos pinnoitetun telan pituus on 10 m ja viivakuorma 80 kN/m, aiheuttaa se 400 kN kuorman päätylaakeria kohti. Kovassa kalanteroinnissa viivakuormat ovat yleensä suurempia, mutta vastaavasti telat lyhyempiä ja useilla päällekkäisillä teloilla on mahdollista pienentää laakerikuormaa. (Valmet 2016)

Telan laakeroinnissa pitää ottaa huomioon sekin, että taipuma aiheuttaa laakereihin jonkin verran myös aksiaalista kuormaa. Taipuma aiheuttaa myös virhettä laakeroinnin asemointiin. Tämän vuoksi telojen päädyissä suositaan pallomaisia laakereita, jotka sietävät aksiaalista virhettä. Pienissä teloissa käytetään usein kuulalaakereita. Isommissa teloissa käytetään rullalaakereita. Yksi taipumakompensoinnin hyödyistä on siinä, että se vähentää päätylaakeroinnin kuormaa. (Roisum 1996: 105–106)

Kestovoideltujen laakerien kiinteät kustannukset ovat alhaiset. Nämä laakerit ovat usein riittävä ratkaisu vaatimattomiin sovelluksiin. Kun koneen käyttötunnit lisääntyvät, kierto-voitelun tuntikustannukset alenevat kannattavalle tasolle. Öljyn kierto, suodattaminen ja jäähdytys lisäävät koneen käyttöikää ja vähentävät huollosta aiheutuvia käyttökatkoksia. Koneiden suunniteltu käyttöikä voi olla jopa 40 vuotta. (Roisum 1996: 108–109)

Luku 3

Ilmalaakerit

Tässä luvussa kuvataan ilmalaakerien toimintaperiaate ja käyttökohteet yleisesti, ja käydään läpi aiheesta tehtyjä aikaisempia tutkimuksia. Erityisesti keskitytään aerostaattisiin laakereihin, koska niiden toimintaperiaatetta voidaan soveltaa ilmalaakerina toimivassa tiivisteessä eli aerostaattisessa tiivisteessä. Tällaisen erityisen ilmalaakerin toimintaperiaatetta voidaan hyödyntää niin sanotuilla plus- ja miinuskammioilla erotetussa paineilmalla taipumakompensoidussa telassa.

3.1 Toimintaperiaate

Ilmalaakereiden toiminta perustuu laakerin ja vastinpinnan välissä olevan ilmakalvon paineistumiseen ilman kokoonpuristumisen seurauksena. Paineistuminen voidaan aikaansaada kolmella tavalla. Hydrodynaamisissa (ts. aerodynaamisissa) laakereissa pintojen yhden-suuntainen liike aiheuttaa paineen nousun kiilamaisessa raossa. Hydrostaattisissa (ts. aerostaattisissa) laakereissa ilma syötetään ohuisiin ilmarakoihin, joissa kuristuva ilmanvirtaus aikaansaa paineen nousun. Puristuskalvoa hyödyntävissä laakereissa pintojen toisiaan vastaan kohtisuora liike aikaansaa väliaineen paineen nousun.

Ilmalaakerien etuja neste- ja öljyalaakereihin verrattuna ovat pienempi kitka (Araki et al. 2015) ja vähäisempi kuluminen (Muzakkir et al. 2015). Kun laakerille syötetään paineilmaa, kontaktia laakerin ja vastinpinnan välillä ei koneen käynnin aikana ole. Vierintälaakereilla, pois lukien keraamiset hybridilaakerit, tämän kontaktin voimavaikutusta tasaa öljykalvo laakerin pyöriessä laakerikuulien tai -rullien samalla syrjäyttäessä öljyä. Hydrostaattisilla liukulaakereilla kontaktin estää öljynpaineesta aiheutuva noste myös vastinpintojen ollessa liikkumatta.

Ilmalaakereissa väliaineen viskositeetti on hyvin alhainen, ja paineen vaikutus ilman viskositeettiin on vähäinen alhaisilla paineilla. Tämän seurauksena kitka ja lämmöntuotto ovat vähäisempiä. Ilmalaakerit eivät tarvitse erillistä jäähdytystä. Kaasun sisäisessä virtausvastuksessa syntyvä vähäinen lämpö poistuu liikkuvan ilman mukana, ja laakeri saavuttaa lämpöstabiliteetin nopeasti. Ilman purkautuessa ja paineen laskiessa ilman lämpötila laskee, mikä edesauttaa lämpötilan pysymistä matalana, ja saattaa aiheuttaa jopa ilman-kosteuden kondensoitumista.

Väliaineena kaasulaakereissa käytetään lähes poikkeuksetta ilmaa sen helpon saatavuuden ja hyvien ominaisuuksien vuoksi. Inertimpien kaasujen kuten esimerkiksi typen ja hiilidioksidin käytöstä ei ole merkittävää hyötyä, koska ne käyttäytyvät kemiallisia ominaisuuks-

sia lukuun ottamatta kuten kaikki muutkin ideaalikaasut (Nelson Air 2016). Jos kompressorin sijaan laakerin ilmanlähteenä käytetään pelkkää paineastiaa, se voidaan toki täyttää vaihtoehtoisella kaasulla muista kuin itse laakerin toimintaan liittyvistä syistä. Tällaisia syitä voivat olla esimerkiksi paloturvallisuusasiat.

Aerostaattisten laakerien lepokitka ja hitaiden nopeuksien liikekitka ovat samansuuruiset (Muzakkir et al. 2015), joten stick-slip -ilmiötä ei ole. Aerostaattisen ilmalaakerin kuorimankantokyky on hyvä myös silloin, kun liikettä ei ole. Tästä on etua koneenosille, joissa esiintyy paljon värähtelyä, ja joiden laakerit voivat olla alttiita värähtelykulumiselle pysähdyksissä ollessaan. Aerostaattisesti laakeroiduissa koneenosissa ei tarvitse ylläpitää liikettä värähtelykulumisen estämiseksi. Voiteleva kalvo säilyy, kunhan ilmakalvon paine pidetään riittävällä tasolla, toisin kuin vierintälaakereilla, joiden toiminta on osittain hydrodynaamista. Samasta syystä hydrostaattiset (ts. aerostaattiset) ilmalaakerit soveltuvat hyvin myös edestakaisen liikkeen laakerointiin.

Ilmalaakereissa käytettävä väliaine voidaan päästää lähes kaikissa tapauksissa suoraan ympäristöön. Tästä on etua ympäristöystävällisyyden näkökulmasta, ja myös siinä mielessä, että käytettävä väliaine on aina uutta, ja sitä on lähes aina saatavilla. Öljyvoitelussa väliaine kerää epäpuhtauksia ja muuttuu kemiallisesti, mikä pitää ottaa huomioon koneiden käyttöikä ja huoltotoimintaa suunniteltaessa. Ilmalaakerit ovat pääsääntöisesti huoltovapaita, kunhan riittävästä ilmanpuhtaudesta huolehditaan (Muzakkir et al. 2015).

Ilmalaakerien merkittävimpiä haittapuolia ovat paineilmankulutus jatkuvassa käytössä sekä vaatimukset korkealle ilmanpuhtaudelle ja alhaiselle ilmankosteudelle. Ilmalaakerit ovat alttiita itseherätteisille pneumaattisille värähtelyille (Charki et al. 2013). Väliaineen alhaisesta puristuskestävyydestä johtuen ilmalaakerien, etenkin kammiollisten, jäykkyys on alhainen, joka ei yleensä ole toivottu ominaisuus. Tästä syystä ilmakammiolliset laakerit eivät yleisesti sovellu koneenosien perinteisten laakerien korvikkeiksi. Sen sijaan kokeemukset huokoisesta materiaalista valmistetuista ilmalaakereista ovat hyviä (Calonius et al. 2012).

Ilmalaakerien alhainen jäykkyys ei kuitenkaan automaattisesti aiheuta stabiliteettiongelmia. Oikein mitoitettuna, asennettuna ja säädettynä ilmalaakeri voi olla erittäin stabiili. Ilmalaakerien jäykkyys on helpommin ymmärrettävissä ja hallittavissa kuin perinteisten laakerien dynamiikka, joiden toimintaan voi vaikuttaa useita epälineaarisia osatekijöitä. (Nelson Air 2016)

Tämän työn kannalta kiinnostavia laakereita ovat aerostaattiset laakerit, sillä niiden toimintaperiaate on suoraviivaisesti sovellettavissa aerostaattiseen tiivisteseen. Myös aerodynamiikan tiivisteiden mahdollisuutta telan paineilmakäyttöisessä taipumakompensoinnissa pohdittiin työn alussa. Tällainen tiiviste toimisi telan vaipan sisäpinnalla lentokoneen siiven tavoin. Tämä edellyttäisi ilmavirtausta, joka aikaansaisi tiivisteseen nosteen. Ongelmana

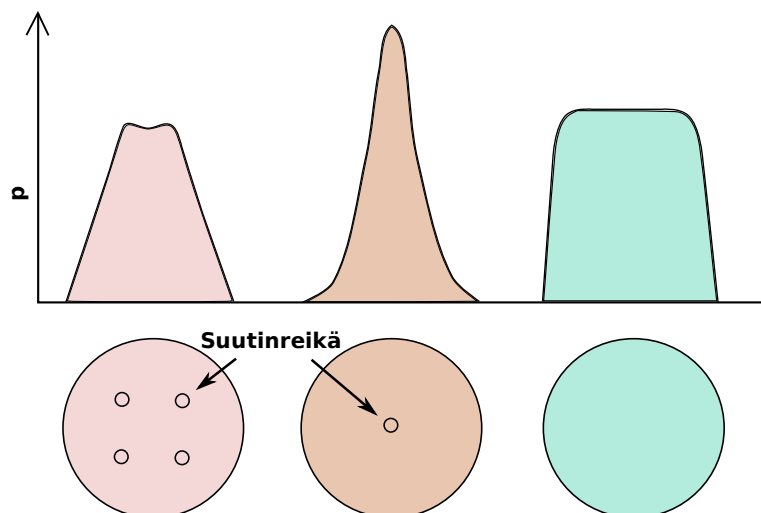
tässä olisi se, että ilmavirtausta ei syntyisi telan ollessa pysähdyksissä tai pyöriessä alhaisilla kierroksilla. Riittävää ilmavirtausta ei ehkä syntyisi edes telan pyöriessä suurilla kierroksilla, koska plus- ja miinuskammioiden ollessa erotettuna suotuisan laminaarisen virtauksen syntyminen saattaisi estyä. Nosteen kehittyminen lentokoneen siipiin eroaa siinä, että lentokoneen liike suhteessa paikallaan pysyvään ilmaan aikaansaa riittävän ilman liikkeen nosteen synnyttämiseksi.

3.2 Nykytilanne

Ilmalaakereita käytetään kohteissa, joissa öljyn viskositeetti olisi liian suuri, ja kohteissa, joissa öljyn vuotamisesta aiheutuisi merkittävää haittaa. Näitä ovat suurella pyörimisnopeudella käyvät koneistuslaitteet ja erikoistyökalut kuten hammaslääkärin porat (Kuang-Chao et al. 2002: 636). Stick-slip -ilmiön puuttuminen helpottaa tarkkaa asemointia. Ilmalaakereita käytetäänkin myös tarkkuusmittalaitteissa. Ilman alhainen viskositeetti paitisi edellyttää vastinpintojen mittatarkkuutta myös aikaansaa sen, että mittalaitteen vaatimaa pientä välystä ja hyvää mittatarkkuutta voidaan ylipäättään soveltaa.

Aerodynaamisia laakereita käytetään gyroskoopeissa ja tietokoneen kovalevyissä. Jälkimmäisissä neulamainen magneettinen lukupää kelluu nopeasti pyörivän kiekon päällä (Kuang-Chao et al. 2002: 636). Puristuskalvoon perustuvia ilmalaakereita käytetään kiihtyvyyssantureissa (Houlihan 2005). Ilmapatjallisia laakereita käytetään erittäin raskaiden kuormien lyhytkestoisiin siirtoihin (Calonius et al. 2012). Lyhytaikaisessa käytössä ilmatyynyaluksen periaatteella toimivan kuormansiirtoyksikön suuri ilmankulutus ei ole merkittävä ongelma.

Aerostaattisilla laakereilla voidaan korvata perinteiset liuku- ja vierintälaakerit periaatteessa lähes kaikissa käyttökohteissa. Jos käyttökohteessa vaaditaan suurta jäykkyyttä, tämä aikaansaadaan tarpeeksi pienellä ilmaraolla esimerkiksi esipuristusta käyttämällä. Huokoisesta materiaalista valmistetulla laakerilla saavutetaan myös hyvä jäykkyys, mutta vastinpinnan pitää olla mittatarkka ja pinnanlaadultaan sileämpi kuin öljyvoiteluun perustuvilla pronssilaakereilla, koska ilman alhainen viskositeetti edellyttää kapeaa, luokkaa 5...15 µm olevaa ilmarakoa (Theska 2004) ja alhaista pinnankarheutta. Pinnan korkeusvaihtelu saa olla maksimissaan 25 % ilmaraon paksuudesta (New Way Air Bearings 2016). Huukoisilla ilmalaakereilla saavutetaan tasainen painejakauma laakerin ja vastinpinnan väliin. Kuvassa 3.1 on verrattu rei'itettyjen laakereiden painejakaumaa huukoiseen laakeriin.



Kuva 3.1: Huokoisella ilmalaakerilla (oikealla) saadaan laakerin ja vastinpinnan väliin tasaisempi painejakauma kuin rei'itetyillä laakereilla (New Way Air Bearings 2016).

Ilmalaakeria voidaan käyttää myös kaarilaakerina, joka vierintälaakerilla on hankalaa ja usein mahdotonta toteuttaa. Kaarilaakerilla tarkoitetaan akselin laakeria vastaavaa konstruktiota, joka ei peitä akselia koko pyörähdyspinnaltaan. Etuna on erittäin suurien akselien verrattain helppo laakerointi. Vastaavasti kaarilaakerointi soveltuu telan laakerointiin vain sisäpuolelta. Radiaalilaakeri voi olla kupera tai kovera.

Ilmalaakerointijärjestelmä edellyttää paineistettua, riittävän puhdasta ja riittävän kuivaa ilmaa. Paineilmaa on etenkin suuremmissa teollisuuslaitoksissa lähes poikkeuksetta saatavilla. Paineilmakompressorit ovat jokseenkin vakiintunutta ja edullista tekniikkaa. Ilmalaakereissa vaadittavat paineet eivät ole suuria eikä ilmankulutukseen yleensä aiheuta ongelmaa. Ilmalaakereissa käytetään yleensä kuristuksia, jotka rajoittavat ilmankulutusta silloinkin, kun laakeri ei ole kontaktissa vastinpintaan.

Ilmalaakerointijärjestelmä on kokonaisuus, jonka suunnittelussa pitää ottaa huomioon paitsi laakerointi itsessään myös muiden paineilmakomponenttien vaikutus järjestelmään. Kuten perinteisissäkin laakereissa, voiteluaineen laadulla, tässä tapauksessa ilmanlaadulla, on merkitystä komponenttien kestävyyskannalta. Monissa paineilmatyökaluissa vaadituksi käyttöpaineksi on ilmoitettu 100 psi eli suunnilleen 7 bar. Paineita järjestelmässä onkin usein tarjolla 6...10 bar, joka täytyy ottaa huomioon ilmalaakereita suunniteltaessa. Paineilmalle on myös käyttötarkoituksia, joihin riittää huomattavasti alhaisempikin käyttöpaine, kuten esimerkiksi ruiskumaalaus, jossa tullaan toimeen niinkin alhaisella kuin 0,5 bar paineella.

Suunnittelussa on otettava huomioon myös se mahdollisuus, että paineilmajärjestelmän riittämättömän tuoton seurauksena ilmanpaine on suunniteltua alhaisempi. Niin ikään on muistettava se, että kompressorin voitelun seurauksena paineilma saattaa sisältää öljy-

mua. Se voi pahimmassa tapauksessa tukkia ilmalaakerin kuristukset, jos öljyä on liikaa tai ilmalaakerijärjestelmässä ei ole käytetty ilmanpuhdistinta (Nelson Air 2016). Ilmanpuhdistin (Kuva 3.2) ei oleellisesti nosta ilmalaakeroinnin kustannuksia.



Kuva 3.2: Ilmankuivain, ilmanpuhdistin ja paineenalenninventtiili. (Nelson Air 2016)

3.3 Tulevat käyttökohteet

Jotkut ilmalaakerien mahdollisista tulevista sovelluksista ovat antaneet odottaa itseään jopa useita vuosikymmeniä. Tuoreimpana esimerkkinä mainittakoon Hyperloop-juna, joka perimmäiseltä idealtaan on jo suhteellisen vanha keksintö. Ajatuksen pneumaattisesta rautatiestä esitti putkipostin keksijä, George Medhurst jo 1800-luvun alussa, ja ilmapatjan varassa kulkevaa Aérotrain-junaa testattiin Ranskassa 1960-luvulla.

Uudempi Hyperloop-konsepti eroaa Aérotrainista mm. siinä, että toteutuessaan eri puolille maailmaa kaavailut junat perustuisivat alipaineistettavaan putkeen, jossa matkustuskapseli kelluisi ilmalaakeroituna tai vaihtoehtoisesti magneettilevitaatioon perustuen. Konsepti on enimmäkseen idea-asteella. Toistaiseksi ratkaisemattomia käytännön ongelmia on useita. Hyperloop Transportation Technologies on pääosin joukkorahoituksella toimiva tutkimusyritys, joka kehittää Hyperloopia ohjelmistokehityksessä yleisesti käytetyllä ”avoimen lähdekoodin” periaatteella, jossa kuka tahansa voi osallistua kehitystyöhön.

Tutkimuksen (Chin et al. 2015) perusteella Hyperloop-junan käyttämän matkustusputken pitäisi olla halkaisijaltaan kaksinkertainen projektin alkuperäisiin luonnoksiin verrattuna, jotta matkanopeus olisi viiden prosentin sisällä alkuperäisestä tavoitellusta 1130 km/h nopeudesta. Vaikka tutkimus osoittaa sen, että konseptissa on paljon hiomattomia yksityiskohtia, sen perusidea vaikuttaa toteuttamiskelpoiselta, joskin vaatii useiden teknisten osa-aluiden moniosaamista ja saumatonta yhteen liittämistä.

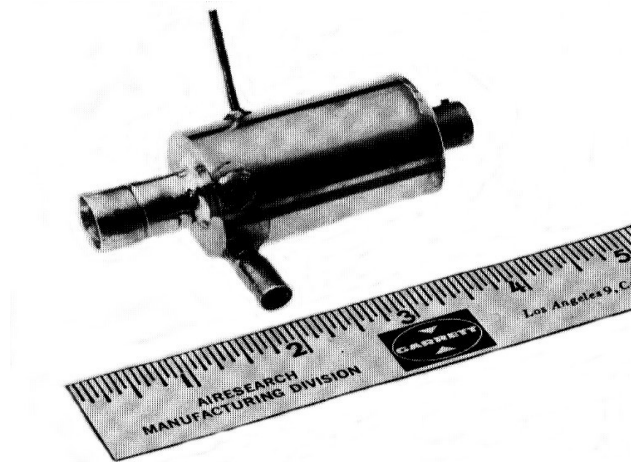
Hyperloop-junassa hyödynnettäisiin sekä aerodynaamista että aerostaattista ilmalaakerointia. Asemalla seistäessä ja liikkeelle lähdettäessä junan laakerointi olisi aerostaattinen.

Nopeuden kasvaessa hyödynnettäisiin aerodynaamista nostetta (SpaceX 2016). Tämä periaate voisi mahdollisesti olla hyödynnettävissä taipumakompensoidun telan tiivistelaakereissa siten, että telan pyöriminen suurilla nopeuksilla lisäisi tiivistelaakerin kuormankantokykyä aerostaattisen nosteen lisäksi aerodynaamisella nosteella.

Ilmalaakereita on toistaiseksi sovellettu melko vähän erittäin kuumien ja erittäin kylmien olosuhteiden koneenosien laakerointiin. Siihen ne soveltuisivat öljyllä voideltuja laakereita paremmin, sillä lämpötilan vaikutus väliaineen viskositeettiin on ilmalaakereilla merkittävästi alhaisempi hydrostaattiseen öljyvoiteluun verrattuna. Dellacorte (2008) on tutkinut turbiinien ilmalaakerointia 650 °C lämpötilaan asti. Tavoitteena on ilmalaakerien soveltaminen käytettäväksi öljyttömissä turboahtimissa ja jopa kaasuturbiineissa. Tutkimuksessa kehitettiin testipenkki äärimmäisiä olosuhteita varten. Sillä voitiin mitata laakerin vääntömomenttia käynnistyksessä, sammutuksessa ja erittäin nopeassa käytössä (70 000 $1/\text{min}$).

Hou et al. (2000) on verrannut tutkimuksessaan kahta uudentyyppistä kalvoilmalaakera sovellettavaksi Braytonin työkiertoon perustuvan kylmälaitteen turbiinin laakerointiin. Laakerien toimintaa testattiin aina pyörimisnopeuteen 122 000 $1/\text{min}$ asti. Pyörimisnopeutta ja resonansseja tarkkailtiin FFT-analyysillä. Väliaineena laakereissa käytettiin ilmaa, johon myös kylmälaitteen työkierto perustui. Vastaavan tyyppisiä kylmälaitteita käytetään myös esimerkiksi heliumin nesteyttämiseen.

Yksi kalvoilmalaakerien ensimmäisimmistä erikoissovelluksista kylmälaitteissa on ollut pyörimisnopeuteen 700 000 $1/\text{min}$ saakka testattu ilmalaakeroitu mikroturbiini (Kuva 3.3) kuusivaiheiseen heliumkäyttöiseen kylmäkoneeseen (Barnett et al. 1970). Vaikka kalvoilmalaakerit ovatkin lähes 50 vuotta vanhaa tekniikkaa, rajat niiden kehityksessä eivät vielä ole tulleet vastaan. Materiaalitekniikan kehittyminen laajentaa niiden käyttömahdollisuuksia (Dellacorte 2016).



Kuva 3.3: Kaasulaakeroitu mikroturbiini heliumkäyttöiseen kylmäkoneeseen. (Barnett et al. 1970)

Vauhtipyörä on maailman vanhimpia energianvarastointiin käytettäviä koneita (Alanen et al. 2003). Komposiittimateriaalien sekä generaattori-, sähkömoottori- ja invertteriteknikan kehittyminen ovat laajentaneet vauhtipyörän käyttömahdollisuuksia. Hiilikuitukomposiittisilla vauhtipyörillä voidaan varastoida merkittävästi suurempia energiamääriä kuin teräksestä valmistetuilla. Korkean pyörimisnopeutensa vuoksi tällaiset vauhtipyörät edellyttävät erikoislaakereiden käyttöä. Alasen mukaan ilmalaakerien etuna on se, että ne toimivat suoraan roottorissa. Magneettilaakerit ja suprajohtavat magneettilaakerit toimivat myös tyhjiössä, mutta vievät paljon tilaa, ovat kalliita ja vaativat vielä kehitystyötä.

Ilmalaakerien tulevana käyttökohteena tässä työssä ehdotetaan niiden soveltamista tiiviste-laakeriksi. Aerostaattisille tiivisteille soveltuisivat käyttökohteiksi periaatteessa kaikki sellaiset sovellukset, joissa tiivisteiden vastinpinta liikkuu suhteessa tiivisteeseen, ja joissa öljyä ei voida käyttää voiteluaineena. Eräs tällainen käyttökohde voisi olla toisessa luvussa kuvatun taipumakompensoidun telan plus- ja miinuskammioiden erottavien tiivisteiden laakerointi.

Tärkeimpiä ilmalaakerien soveltamista edistäviä osatekijöitä ovat materiaalitekniikan kehittyminen, tarkkojen koneistusmenetelmien kehittyminen ja tietokonesimuloinnin tarkkuuden kehittyminen ilmalaakerien suunnittelussa.

Luku 4

Aerostaattisen tiivisteen suunnittelu

Tässä luvussa esitetään mittauksia varten suunnitellun laakerin vaatimuslista sekä yhden mahdollisen tiivistelaakeritoteutuksen toimintorakenne. Lisäksi käydään läpi osatoimintojen toteutusvaihtoehtoja ja suunnitteluperiaatteita sekä ilmalaakereihin liittyviä fysikaalisia tekijöitä. Aerostaattisella tiivisteellä tarkoitetaan tiivistettä, joka on samanaikaisesti sekä ilmalaakeri että tiiviste. Oleellista on siis paitsi ilmalaakeritoiminta myös mukautumiskyky vastinpintaan, jos vastinpinta on alttiina muodonmuutoksille tai geometriavirheille.

Aerostaattisen tiivisteen periaatteellinen ero varsinaiseen ilmalaakeriin on siinä, että aerostaattiselta tiivisteeltä ei välttämättä vaadita kuormankantokykyä kuin vain sen verran, mikä tiivistyksen kannalta on tarpeellista. Oleellista on kantaa kuormaa vähintään tiivistettävän kammion hydrostaattisesta paineesta aiheutuvan voiman verran, jotta tiivistysominaisuudet eivät merkittävästi muutu olosuhteiden vaihdellessa. Kammio tai laakeri, jonka ilmanpainetta tiivisteen avulla ylläpidetään, kantaa suurimman osan kokonaiskuormasta.

4.1 Vaatimuslista

Koelaakerin avulla oli tavoitteena pystyä mittaamaan tiivistekonstruktion paineilmankulutusta siten, että ilmankulutusta voitaisiin arvioida tiivistemetriä kohti. Ehdottomina vaatimuksina olivat täysi ilmalaakeritoiminta kosketuksettomasti vastinpintaan ja kohtuullisella tasolla pysyvä ilmankulutus, joka ei oleellisesti poikkeaisi kaupallisista laakereista.

Lisäksi toivomuksina olivat laakerin valmistettavuus Koneensuunnittelun laboratoriossa sekä mahdollisuus kiinnittää laakeri mittauksia varten kärkeäsoorviin perustuvaan testipenkkiin. Toivomuksena oli myös mahdollisuus mitata tiivisteen ilmarakoa. Keskeisimmät vaatimukset ja toivomukset on esitetty vaatimuslistassa (Taulukko 4.1).

Taulukko 4.1: Aerostaattisella tiivisteellä varustetun koelaakerin vaatimuslista.

v_T	Ilmalaakeritoiminta
V	- Kosketukseton jatkuva-aikaisesti
V	- Kokonaisilmankulutus, $Q < 20 \text{ l/min}$
V	- Kammion painetaso, $p_K = 2...3 \text{ bar}$
V	- Suurin laakerikuorma, $F_{\max} = 2000...4000 \text{ N}$
V	- Tiivisteiden paineenkestävyys, $p_T = 3...4 \text{ bar}$
v_T	Konstruktio ja työturvallisuus
V	- Kammiopaine, tiivistepaine ja tiivistekuorma erikseen säädettävissä
V	- Laakerin pyörimisen esto
T	- Kiinnitettävyyden laboratorion sorviin
T	- Laajennusmahdollisuus erilaisille tiivistekonsepteille
v_T	Mittaukset
V	- Kammion ja tiivisteiden ilmankulutukset erikseen mitattavissa
V	- Kammiopaine ja tiivisteiden syöttöpaine mitattavissa
V	- Laakerin kokonaiskuorma mitattavissa
T	- Tiivisteiden ilmarako mitattavissa
T	- Tiivisteiden kuorma erikseen mitattavissa
v_T	Valmistettavuus
V	- Tiivistemateriaali työstettävissä ilmalaakeripinnaksi
V	- Tiivistemateriaali laserporattavissa
T	- Laakeri valmistettavissa Koneensuunnittelun laboratoriossa

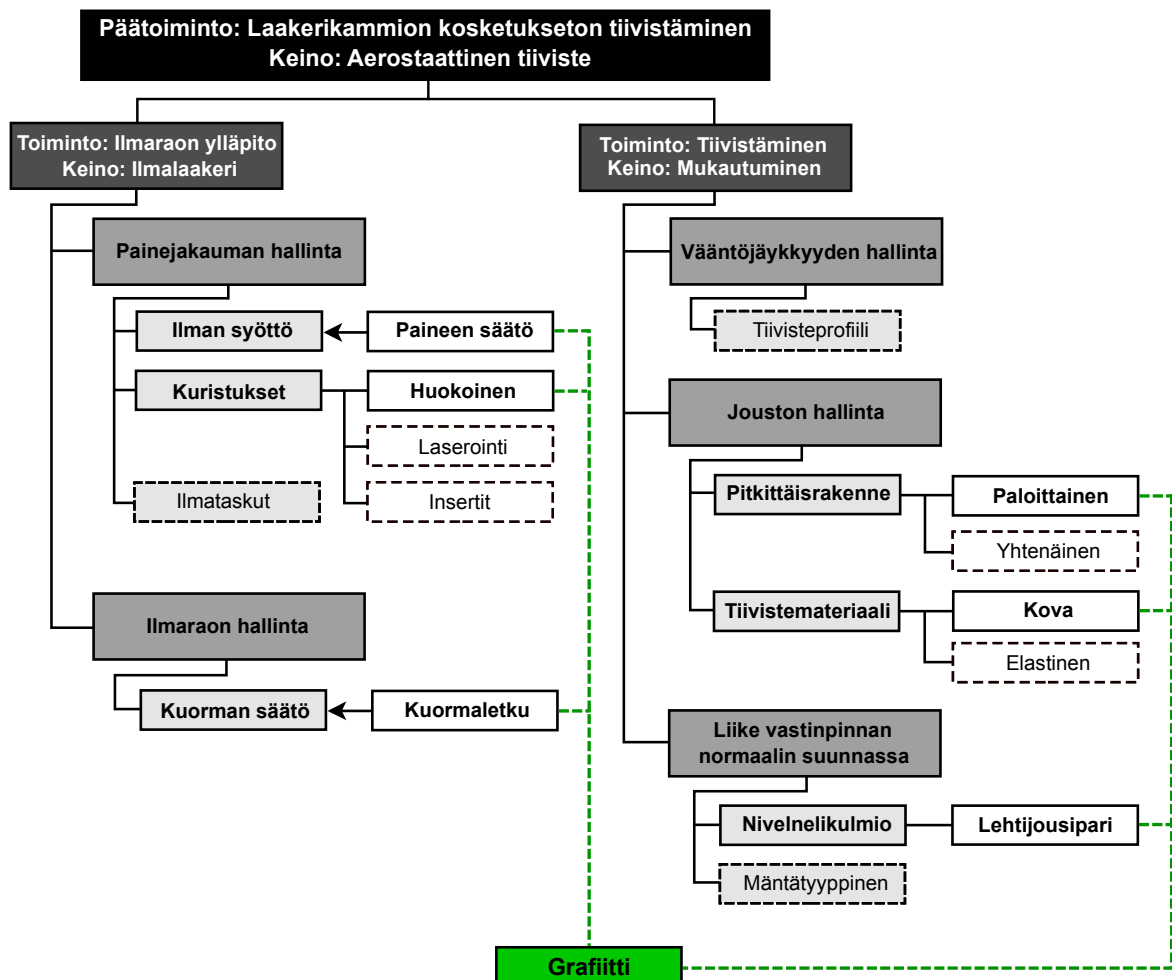
4.2 Toimintoanalyysi

Kuvassa 4.1 esitetty aerostaattisen tiivistyksen toimintorakenne kattaa taipumakompensoidun telan aerostaattiset tiivisteet siten, että pluskammion konstruktioa ja toimintaa ei ole sisällytetty toimintorakenteeseen. Toimintorakenne ei siis ole koko taipumakompensoidun telan funktionaalinen kuvaus. Toimintorakenteessa ei myöskään ole eritelty päätytiivisteitä, joiden toteutus sekä näiden liitos aksiaalitiivisteisiin vaatii oman erillisen suunnittelunsa, ellei yhtenäistä tiivistelistaa voida käyttää.

Osatoimintojen kaikkia mahdollisia toteutusvaihtoehtoja ei myöskään ole sisällytetty kaavioon. Työssä ideoituja ratkaisuvaihtoehtoja ei ole pisteytetty. Yksinkertaistettuna esimerkiksi on eräs huokoisen laakerimateriaalin toteutusvaihtoehdoista aerostaattiseksi tiivisteeksi. Tätä ei kuitenkaan valittu koelaakerin konstruktioksi, sillä huokoisten laakerien hinta on korkea, ja niiden soveltamiseen tiivisteeksi liittyy muitakin vielä ratkaisemattomia ongelmia.

Varmuutta ei esimerkiksi ollut siitä, voisiko huokoisia laakereita ylipäättään paloitella, ja minkälaisen haasteen näiden palasten yhdistäminen isommaksi laakeriksi tai tiivistereunaksi toisi tullessaan. Paloittelu olisi tarpeellista tiivisteiden konstruktion riittävän jouston aikaansaamiseksi ja myös siinä tapauksessa, että valmistajalta ei olisi tilattavissa tiivisteiden komponenteiksi suoraan soveltuvia laakereita.

Toimintorakenteessa esitettyjen toimintojen välillä on ristiinkytkeviä. Esimerkiksi ilma-
raon hallinta on yhteydessä liikkeeseen vastinpinnan normaalin suunnassa, ja tiivisteiden
pitkittäisrakenteella on yhteys vääntöjäykkyyden hallintaan ja sitä kautta tiivisteprofiilin
rakenteeseen. Jos tiivistemateriaalina käytetään kimmomoduuliltaan jäykkää grafiittia ja
tiivisteprofiili on umpinainen, tavoiteltu tiivistelistan vääntöjäykkyyden taso voidaan
saavuttaa tiivistepalojen joustavalla liitoksella, esimerkiksi grafiittisten tiivistepalojen vul-
kanoinnilla. Toimintona tiivistäminen tarkoittaa tässä yhteydessä pikemminkin ilmavir-
tauksen rajoittamista kuin sen täydellistä estämistä, koska ilma-vaatimuksesta seuraa
aina jonkinlaista ilmavirtausta.



Kuva 4.1: Aerostaattisen tiivistyksen yksinkertaistettu toimintorakenne. Esimerkkinä tiivistemateriaalin funktionaaliset kytkennät käytettäessä huokoista grafiittia.

4.3 Tiivistekonstruktion suunnittelu

Jo koelaakerin suunnittelun varhaisessa vaiheessa päätettiin valmistaa tasomainen ilmakammiollinen laakeri, jonka tiivistemateriaaliksi valittiin muovi. Päätökseen vaikuttivat käytettävissä olevat koneistusmenetelmät, laserporauksen rajoitukset ja soveltuvien huokoisten laakerien heikko saatavuus. Alustavasti arvioitiin, että tiivisteiden ilmakuristukset täytyisi valmistaa laseroimalla. Tiivisteiden kuorman säätöön ideointiin paineistettavaa letkua.

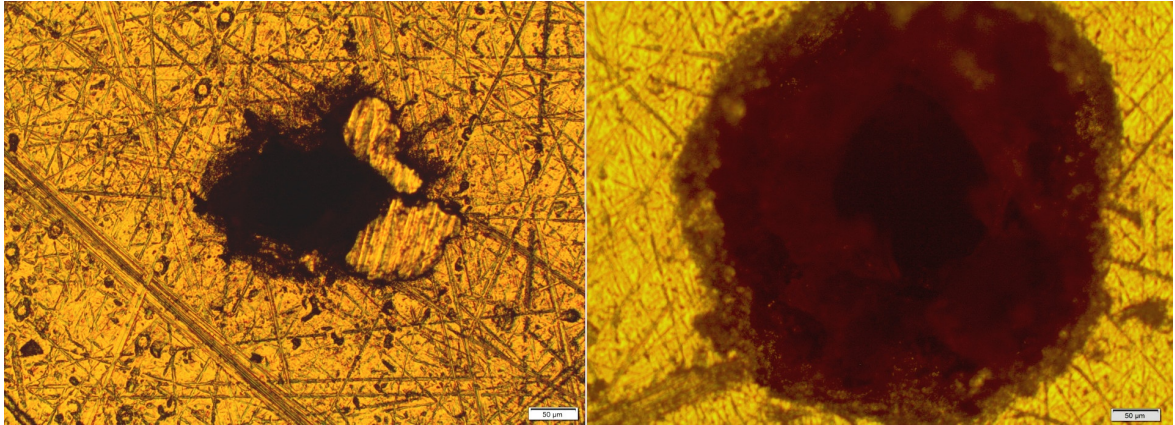
Tiivisteestä päätettiin valmistaa yhtenäinen. Tiedossa oli, että suunnitellun laakerikonstruktion avulla ei saataisi ratkaistuksi pääty- ja aksiaalitiivisteiden liitostapaa. Toisaalta kyseisten komponenttien ja näiden liitosten osuutta ilmankulutuksesta olisi ollut vaikeaa erotella mittauksissa, siksi ilmankulutuksen arviointi tiivistemetriä kohti edellytti yhtenäistä saumatonta rakennetta.

Toteutuessaan mahdollisessa telasovelluksessa luultavasti jouduttaisiin käyttämään erillisiä pääty- ja aksiaalitiivisteitä, joskaan yhtenäisen kammiotiivisteiden mahdollisuuttakaan ei voida sulkea pois. Yhtenäisellä tiivistereunalla varustetulla tasomaisella laakerilla ei myöskään voitu selvittää telan taipumasta aiheutuvia tiivisteiden jouston hallintaan ja ripustukseen liittyviä ongelmia.

4.3.1 Tiivistemateriaalin valinta

Kivelä (2013) on tutkimuksessaan käyttänyt erillisiä kuristusinserttejä laakerin ilmasuuttimina. Nämä eivät valmistusteknisistä syistä soveltuneet aerostaattisen tiivistepinnan ilmareikien tekoon. Ongelmia olisi tuottanut lähinnä kuristusten liittäminen muoviseen tiivistepintaan. Alustava päätös laseroida reiät rajasi tiivistemateriaalin valinnan muoveihin, sillä käytettävissä olleiden laserkoneiden teho ei olisi riittänyt metallien kuten esimerkiksi alumiinin rei'itykseen. Alumiiniseen tiivistepintaan olisi mahdollista kiinnittää erillisiä suuttimia, mutta muovin laserointi tarjoaa inserttireikien koneistukseen ja inserttien kiinnittämiseen verrattuna etua, jos halutaan tehdä paljon pieniä ilmasuuttimia nopeaan tahtiin.

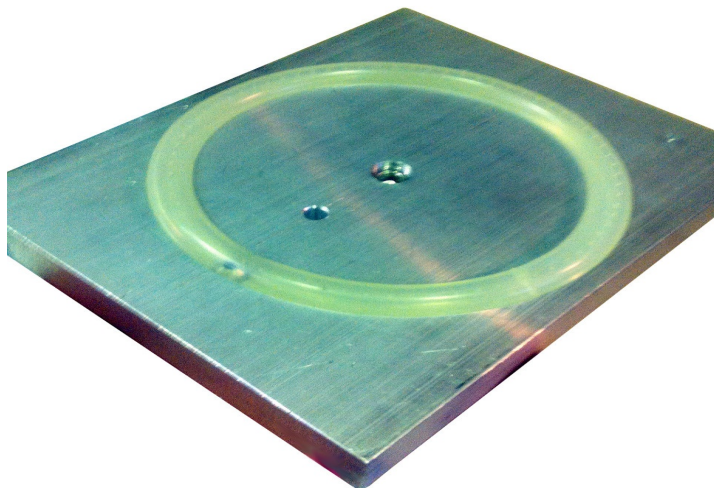
Alumiinin laserointia ilmakuristusten valmistukseen on aiemmin selvitetty MOSES-projektin ilmalaakeritutkimuksessa. Kuvan 4.2 rei'ityskoe on tehty Tampereen Teknillisellä Yliopistolla. Tämän tutkimuksen koelaakerin aerostaattisen tiivisteiden materiaaliksi alumiini ei kuitenkaan oletettu tarjoavan merkittävää hyötyä muoveihin verrattuna.



Kuva 4.2: Laserporattu Ø100 µm reikä alumiinissa lasersäteen sisäänmenon (vasemmalla) ja ulostuloreiän puolelta (oikealla) mikroskooppikuvattuna. (MOSES-projekti 2012)

Laserointi porausmenetelmänä rajasi työn protoiluvaiheessa käytettävät tiivistemateriaalit muutamaan muovilaatuun ja silikoniin, sillä monista muovilaaduista haihtuu laseroinnin aikana myrkyllisiä kaasuja. Tästä syystä esimerkiksi polyvinyylikloridi (PVC) ja polyeteeni (PE) jäivät materiaalivaihtoehdoista pois. Polykarbonaatti (PC) kelpuutettiin mukaan koeporausten pienen määrän vuoksi, vaikka sen laserleikkausta ei yleensä suositella yllä mainituista syistä.

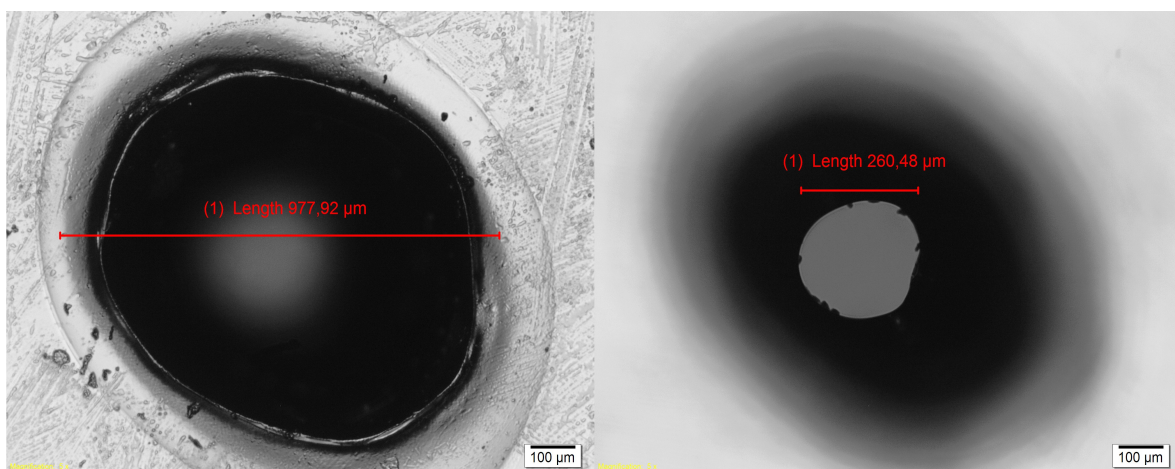
Aiemmissa ilmalaakeritutkimuksissa on valmistettu prototyyppi ilmakammioillisesta laakerista (Kuva 4.3), jonka tiivistereuna oli valmistettu laserilla 4 mm välein rei'itetyistä silikoniletkusta, yhdistetty Ø100 mm ympyräksi ja painettu alumiinilevyyn jyrskytyyn uraan. Alustavissa testeissä tiivistettä ei saatu lainkaan toimimaan aerostaattisesti. Syyksi tähän arveltiin silikoniletkun joustamisesta aiheutuvaa kontaktia letkun ja vastinpinnan välillä ilmareikien välipaikoissa.



Kuva 4.3: Ilmalaakeriprototyyppi, jonka tiivistereunana toimii rei'itetty silikoniletku ja ilmakammiona letkun, laakerin rungon ja vastinpinnan rajaama tila.

Tehtiin oletus, että tiivistemateriaalin kimmomoduulin täytyy olla merkittävästi suurempi kuin silikonin, jotta tiivistepinnalle saadaan enemmän jäykkyyttä ja muotonsa pitävyyttä kuin silikoniletkuun perustuvalle tiivisteelle. Materiaalivaihtoehdoiksi jäivät polyasetaali (POM), PC ja akryyli (PMMA). Näillä materiaaleilla suoritettiin alustavat kokeet käyttäen Epilog Laser Fusion 22 -laitetta, joka perustuu 75 watin tehoiseen CO₂-laseriin.

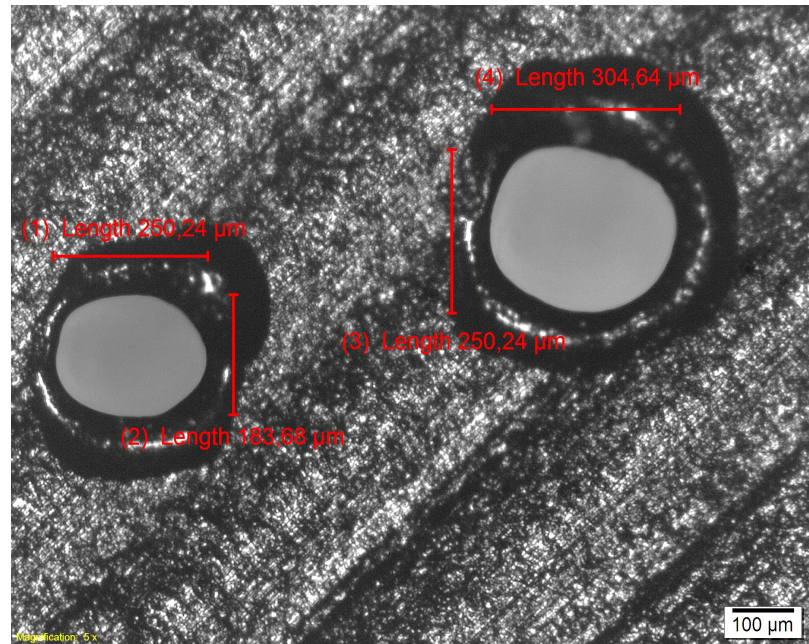
PMMA ja POM käyttäytyivät rei'ityksessä paremmin kuin PC, jolla oli taipumusta sulaa tai palaa hallitsemattomasti. PC-levyn rei'istä ei tullut yhtä siistejä kuin POM- ja akryyli-levyillä. Kuvassa 4.4 on esitetty laserporattu reikä polykarbonaatissa. Siitä käy ilmi reiän huomattava kartiomaisuus. Ominaisuudella saattaa olla jonkinlaista vaikutusta reikien tukautumisriskiin, jos paineilman mukana kulkee partikkeleita.



Kuva 4.4: Laserporattu reikä 5 mm paksuisessa PC-levyssä kuvattuna lasersäteen ulostulopuolelta, tarkennus ulostulopuolelle (vasemmalla) ja sisäänmenopuolelle (oikealla). Tavoitehalkaisijana oli Ø250 µm.

Akryylin laserporattujen reikien kartiomaisuus oli polykarbonaattia vähäisempää, ja reiät olivat ympyrämäisiä, mutta akryylin vaikeahko koneistettavuus rajasi sen materiaalivaihtoehdoista pois. Tiivistekonseptin alustavassa protoiluvaiheessa havaittiin, että koneistettaessa akryyliä se lämmitessään takertuu terään kiinni ja tämän seurauksena työstettävä kapale saattaa rikkoontua lasimaisesti pirstaloitumalla.

Tiivistemateriaaliksi valittiin POM-C, koska sen ominaisuudet laserporauksen, lastuavan työstön ja hionnan kannalta osoittautuivat parhaimmiksi, ja kyseistä materiaalia oli tutki-
musta varten tarjolla. Alustavissa testeissä 3 mm paksuisella POM-C-levyllä päästiin halkaisijaltaan luokkaa Ø200 µm oleviin reikiin (Kuva 4.5). Laserin parametreja ei vielä tässä vaiheessa erityisesti optimoitu.



Kuva 4.5: Laserporattuja reikiä 3 mm paksuisessa POM-C -levyssä lasersäteen ulostulon puolelta kuvattuna.

Taulukossa 4.1 on vertailtu tiivisteiden materiaalivaihtoehtojen keskeisimpiä ominaisuuksia. POM-C -muovin dynaaminen kitkakerroin terästä vastaan on 0,3. Tutkimuksen lähtökohtana olevaa mahdollista paperikonesovellusta ajatellen tiivistettä ei voida käyttää hankaavana tiivisteenä. Kitkakertoimella olisi kuitenkin merkitystä sellaisen tilanteen varalta, jossa tiivisteiden ilmakalvo pettäisi telan pyöriessä. Mahdollisesti voitaisiin sallia tiivisteelle myös sisäänajo, jossa pieni osa tiivistepinnan epätasaisuuksista mukautuisi vaipan sisäpintaan abrasiivisesti kulumalla.

Taulukko 4.1: Vaihtoehtoisten tiivistemateriaalien ominaisuuksia. Lukuarvot on ilmoitettu suulakepuristetuille levyille. Liikekitkakertoimet (μ_k) eivät ole vertailukelpoisia. (Etra 2017)

		POM-C	PC	PMMA
Tiheys, ρ	[g/cm ³]	1,41	1,20	1,18
Kimmokerroin, E	[GPa]	2,8	2,3	3,0
Vetolujuus, σ_T	[MPa]	67	55	70
Kitkakerroin/teräs, μ_k		0,30	0,38	0,54
Kidesulamispiste, T_{sp}	[°C]	166	150	160

4.3.2 Tiivisteprofiili ja painejakauman hallinta

Suurta jäykkyyttä pidetään yleisesti ilmalaakerin hyvänä ominaisuutena, sillä se vähentää riskiä laakerin ja vastinpinnan kosketukseen (Theska 2004). Kun konstruktio sisältää tiivistelaakerein eristetyt ilmakammion, telan sisälle jää lähes väistämättä niin suuri ilmatila, että jäykkyydestä ei voida puhua samassa mielessä kuin pienen ilmaraon kammiottomalla laakerilla. Tämä ei kuitenkaan ole suuri ongelma, sillä telan vaippa ja keskiakseli ovat päätylaakeroinnilla kiinteästi asemoituja, joten kontaktin estää juurikin vaipan ja keskiakselin välinen ilmakammio itsessään. Oleellista on se, että pluskammio toimii säädettävänä tukilaakerina, ei päätylaakerien tapaan asemoivana laakerina.

Ilmakammio sallii myös telan valmistuksessa vaipan sisäpintaan jääviä geometriavirheitä sekä taipumasta aiheutuvan välyksen muutoksen. Suuresta ilmakammioista aiheutuu haittaa ainoastaan telan kuorman muutosten reagoinnin hidastumisena, sillä myös siirrettävä ilmamäärä on suuri. Vaikka kammiollisen ilmalaakerikokonaisuuden jäykkyys on alhainen, siinä käytetyn aerostaattisen tiivistereunan jäykkyyden on silti syytä olla mahdollisimman suuri.

Tiivisteiden suuri pneumaattinen jäykkyys edesauttaa tasaista asemointia vastinpinnalle ja helpottaa tiivisteiden kuorman säätöä. Lähtökohtana siis täytyy olla se, että tiivistepinnan profiilin vapaa muoto myötäilee vastinpintaa, jos tiivistemateriaalin kimmomoduuli on verraten suuri, kuten esimerkiksi POM-muovilla. Suoralla vastinpinnalla tiivistepinnan profiilin siis täytyy olla suora, ja kaarevalla vastinpinnalla sen täytyy olla kaareva kuvan 4.6 mukaisesti. Jos näin ei lähtökohtaisesti ole, tiivisteiden on kuormitettaessa mukauduttava tasaisesti vastinpintaan. Ilmaraon korkeuden täytyy olla luokkaa $5\text{--}15\text{ }\mu\text{m}$, joka edellyttää tarkkaa muotoa ja alhaista pinnankarheutta paksuusvaihtelun ollen vähemmän kuin $\frac{1}{3} h$) (Theska 2004).

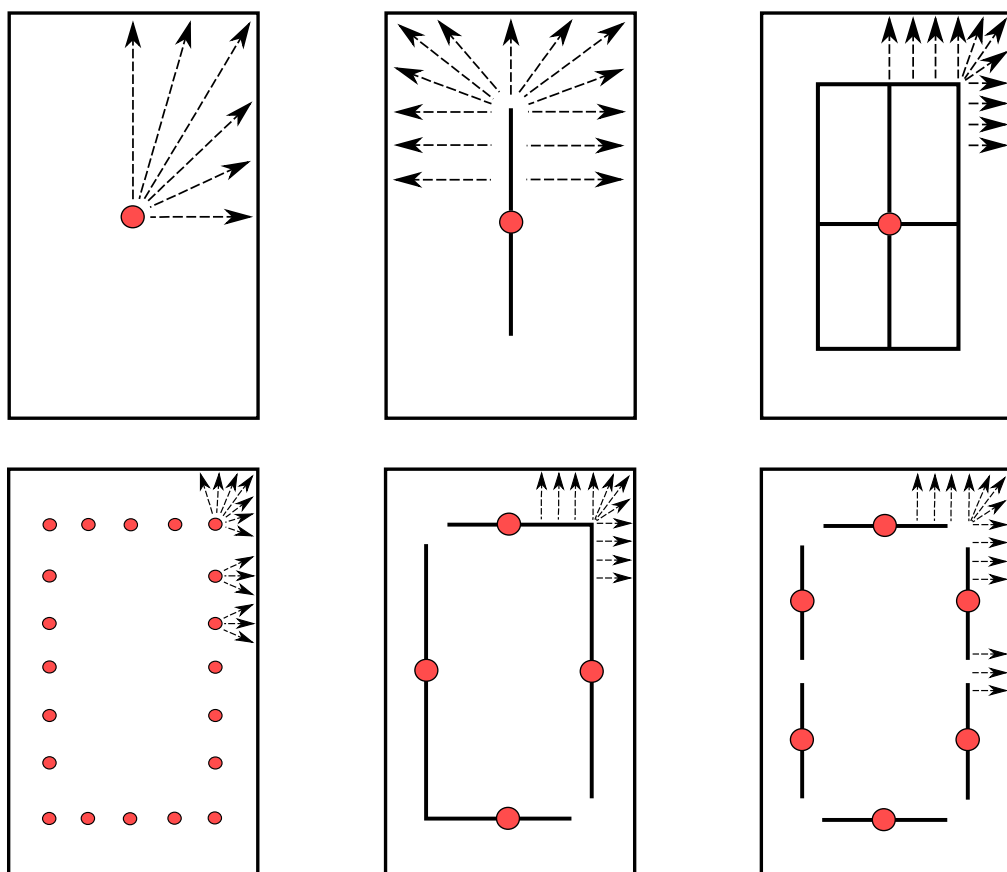


Kuva 4.6: Tiivisteprofiilin lähtökohtana täytyy olla kapean ilmaraon ($h = 5\text{--}15\text{ }\mu\text{m}$) tavoittelu.

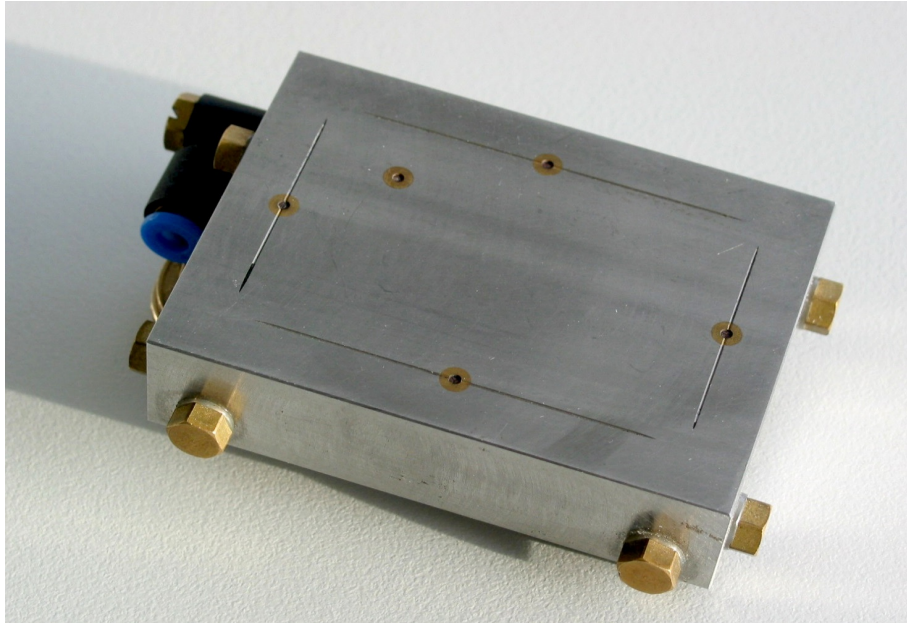
Jos tiivistemateriaalin kimmomoduuli on liian alhainen, se laskee myös tiivisteiden pneumaattista jäykkyyttä. Jos materiaalin kimmomoduuli on liian suuri, tiiviste ei kykene mukautumaan vastinpinnan geometriavirheisiin kuten taipumasta aiheutuviin muutoksiin. Tästä syystä huokoinen grafiitti ei suurikokoisina laakereina tai kuormituskenkinä voi toimia sellaisen vastinpinnan parina, jolle laakeripinnan alueella sallitaan taipumaa tai muita geometrian muutoksia.

Tiivistepintaan lisättävillä ilmataskuilla ja -kanavilla voidaan tasata painejakaumaa vaipan ja tiivisteiden välissä. Niistä on hyötyä muiden muassa ilmakuristusten lukumäärän ja halkaisijan kontrolloinnissa. Koska ilmakuristuksista ei voida – pois lukien huokoiset materiaalit – tehdä halkaisijaltaan mielivaltaisen pieniä eikä niiden lukumäärä voi olla mielivaltaisen suuri, ilmakeinavien avulla voidaan laajentaa yksittäisten kuristusten vaikutusalueita kuvissa 4.7 ja 4.8 esitetyillä periaatteilla.

Painejakaumaa voidaan hallita ilmareikien lukumäärällä, taskumaisilla ilmakeinavilla tai näillä molemmilla. Suositeltu ilmareikien halkaisija on luokkaa $\text{Ø}20\text{...}150\ \mu\text{m}$. Ilmataskujen jakaminen erillisiin omilla ilmakuristuksilla varustettuihin osiin estää kaikkien kanavien paineen laskun, jos yksittäisen ilmakeinavan paine romahtaa liian suuren vuodon seurauksena. (Theska 2004)



Kuva 4.7: Ilmalaakeripinnan painejakauman hallintaperiaatteita. Ilmareiät on merkitty punaisella, ja niiden kokoa on liioiteltu. Painejakauman gradientin suunta on merkitty nuolilla. Periaatteita voidaan soveltaa myös aerostaattisen tiivisteiden suunnittelussa. (Theska 2004)



Kuva 4.8: Ilmalaakerin tai aerostaattisen tiivisteen pintaan voidaan ilmareikien ja -kanavien sijoittelulla luoda epäsymmetrinenkin painejakauma, jos kuormitus sitä edellyttää. (Theska 2004)

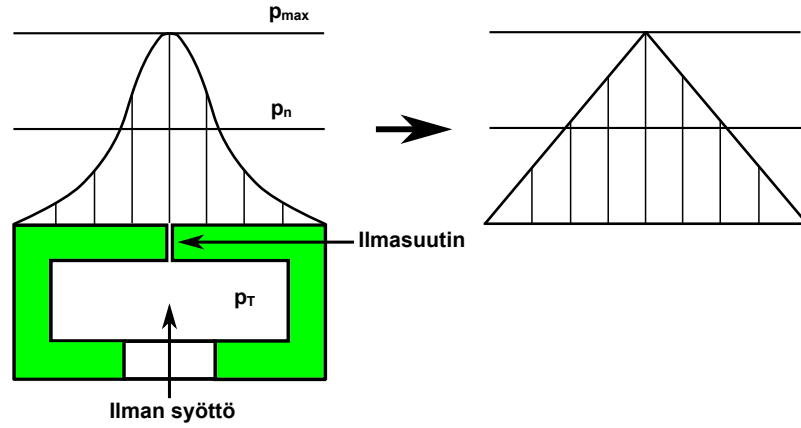
Stick–slip -ilmiön puuttumisen ansiosta aerostaattinen tiivistepinta säilyttää muotonsa liikkeelle lähdetessä, jolloin kitkavoima on nollassa. Ilmaraossa (korkeus h) vallitsee newtonilainen kitka kaavan 4.1 mukaan. Kitkavoima F_{μ} on suoraan verrannollinen dynaamiseen viskositeettiin μ , ilmalaakeri- tai tiivistepinnan alaan A ja vastinpinnan suhteelliseen nopeuteen v . (Theska 2004)

$$F_{\mu} = \mu A \frac{v}{h} \quad (4.1)$$

Ilmakanavat ja -taskut pitää suunnitella mahdollisimman ohuiksi, jotta laakerin tai tiivistepinnan pneumaattinen jäykkyys olisi mahdollisimman suuri. Jos ilmakanavalla halutaan tuoda yhtenäinen paine laakeripinnan eri vyöhykkeille kuvan 4.7 mukaisesti, ilmakanavan korkeuden täytyy olla riittävä, jotta paineen alenemaa ei synny.

Ilmalaakerin tai aerostaattisen tiivistepinnan ja vastinpinnan välinen ilmarako kuristaa pinnalta poistuvaa ilmavirtaa. Liikkuvan ilmavirran kuristus aiheuttaa painehäviötä. Painehäviö aikaansaa ilmarakoon painegradientin. Laakeripinnan suurin teoreettinen kantavuus F_{\max} on painegradientin integraali laakeripinnan yli. Yksittäisen suuttimen kohdalla painejakauma voidaan usein approksimoida kolmiomaiseksi, josta seuraa kuvan 4.9 tiivisteprofiililla kaava 4.2, sillä keskimääräinen paine $p_n < \frac{1}{2} p_{\max}$.

$$F_{\max} = \frac{1}{2} p_{\max} A \quad (4.2)$$



Kuva 4.9: Ilmalaakerin tai aerostaattisen tiivisteen painejakauma voidaan approksimoida kolmiomaiseksi, jos ilmasuuttimet sijaitsevat laakerin tai tiivisteprofiilin keskilinjalla.

Tasaisen kapean raon ilmavirtaus on laminaarista kaikissa pisteissä laakerin ja vastinpinnan välillä. Painehäviö syntyy ilman sisäisen viskositeetin seurauksena. Ilmamassan hitaus voidaan jättää ottamatta huomioon, sillä sen vaikutus on häviävän pieni. Navier Stokesin yhtälöistä saadaan johdettua (kapean raon leveydeltään a ja pituudeltaan x) ilmavirtaukselle painehäviötä kuvaava yhtälö (Kaava 4.3), jossa p_1 on lähtötilavuuden ja p_2 ulostulon ilmanpaine. (Powell 1970: 36–40)

$$p_1^2 - p_2^2 = \frac{24 \mu \dot{m} R T a}{x h^3} \quad (4.3)$$

Kaava 4.3 soveltuu suoran tiivistereunan ominaisuuksien arviointiin, siis esimerkiksi taipumakompensoidun telan aksiaalitiivisteen toiminnan mallintamiseen. Powell on johtanut kaavat myös muille laakerigeometrioille. Kapean tasomaisen pyöreän ilmaraon massavirtalle pätee kaava 4.4. Paine millä tahansa säteen r arvolla lasketaan kaavalla 4.5.

$$\dot{m} = \frac{(p_1^2 - p_2^2) \pi h^3}{12 \mu R T \ln(r_2/r_1)} \quad (4.4)$$

$$p(r) = \sqrt{p_1^2 - \frac{\ln(r/r_1)}{\ln(r_2/r_1)} (p_1^2 - p_2^2)} \quad (4.5)$$

Laakeripinnalla vaikuttaa myösilmakalvon puristumiseen ja kapean raon virtausvastukseen perustuva vaimennus (Kaava 4.6), jonka suuruus määräytyy vaimennuskertoimen ja kalvon paksuuden muutosnopeuden tulona. Reynoldsin yhtälöstä voidaan johtaa vaimennuskertoimelle tapauskohtaisia arvoja. Suorakaiteen malliselle levyllä vaimennuskertoimen kaavan 4.7 mukainen, jossa β on korjauskertoimen, L on levyn pituus ja w on levyn leveys. (Salvatore et al. 2012)

$$F = c \dot{h} \quad (4.6)$$

$$c = \mu \frac{L w^3}{h^3} \beta \quad (4.7)$$

Kun ilmakehän halkaisija pienenee nopeasti, ilma pyrkii puristumaan kokoon, mikä rajoittaa virtausta ja aikaansaa painehäviön. Kuristuksen massavirta (Kaava 4.8) voidaan laskea purkauskertoimen C_d ja virtausfunktion ψ avulla. Purkauserrointa voidaan approksimoida numeerisesti (Kaava 4.9). (Beater 2007: 28–32)

$$\dot{m} = A C_d \psi p_1 \sqrt{\frac{2}{RT}} \quad (4.8)$$

$$C_d = 0,8414 - 0,1002 K + 0,8415 K^2 - 3,9 K^3 + 4,6 K^4 - 1,6827 K^5 \quad (4.9)$$

Beaterin mukaan virtausfunktion arvo riippuu painesuhteesta (Kaava 4.10) ja adiabaattivaation arvosta (Kaava 4.11) siten, että jos $K > K_{\text{lim}}$, saadaan virtausfunktio kaavasta 4.12. Jos puolestaan $K \leq K_{\text{lim}}$, käytetään kaavaa 4.13.

$$K = \frac{p_2}{p_1} \quad (4.10)$$

$$K_{\text{lim}} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (4.11)$$

$$\psi = \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma - 1} \left(K^{\frac{2}{\gamma}} - K^{\frac{\gamma + 1}{\gamma}} \right)} \quad (4.12)$$

$$\psi = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}} \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma + 1}} \quad (4.13)$$

4.3.3 Ilmakuristusten valmistus

Tässä luvussa kuvataan muutamia mahdollisia tapoja valmistaa tiivisteen ilmakuristuksia. Pienten ilmareikien valmistusmenetelmä valitaan ensisijaisesti käsiteltävän laakeri- tai tiivistemateriaalin perusteella, sillä kaikki menetelmät eivät sovellu kaikille materiaaleille. Esimerkiksi perinteinen poraus lastuavalla terällä soveltuu lähes kaikille materiaaleille. Poikkeuksen kuitenkin muodostavat hyvin elastiset materiaalit kuten esimerkiksi polyuretaani sekä erilaiset kumi- ja silikoniyhdisteet.

Mahdollisia valmistusmenetelmiä porauksen lisäksi ovat mm. laserointi, rei'itys kuumalla neulalla, kipinätyöstö ja valaminen ohuiden lankojen avulla. Huokoisten materiaalien ja erillisten kuristusinserttien käyttäminen eivät varsinaisesti ole valmistusmenetelmiä. Aerostaattisen tiivisteen suunnittelussa silti nekin ovat vaihtoehtoisia tapoja ilmavirtauksen kuristukseen. Laserointia käsiteltiin luvussa 4.3.1 eikä sitä käsitellä tässä työssä tämän perusteellisemmin. Myöskään huokoisten materiaalien valmistusmenetelmiin ei perehdytä.

Poraus

Poraus on mahdollista verraten sujuvasti aina halkaisijaan Ø0,2 mm asti. Tätä pienempiä reikiä poratessa työkalun komponenttien epäkeskeisyys aiheuttaa suurimmat ongelmat. Siitä seuraa terän värähtelyä, joka paitsi huonontaa reiän laatua voi myös johtaa terän katkeamiseen. Jotta lastuava leikkausnopeus olisi riittävän suuri, erittäin ohuita poranteriä käytettäessä pyörimisnopeutta pitäisi nostaa niin korkeaan arvoon, jota ei työstökoneen asetuksista yleensä ole valittavissa. (Rantanen 2016)

Pieniä poria käytettäessä karaosan ulkoneman pituuden ja terän halkaisijan suhteesta muodostuu usein kohtuuttoman suuri. Tämä johtuu siitä, että poraistukka ei aina mahdu riittävän lähelle työstettävää kohdetta, jolloin terän täytyy olla porattavan reiän syvyyteen suhteutettuna tarpeettoman pitkä. Seurauksena on terän katkeamisia ja vaikeuksia pysyä vaadituissa toleransseissa.

Poraaminen on mahdollista myös hiovalla työkalulla. Ongelmana on terän ja työstettävän materiaalin lämpenemisestä aiheutuvia plastisia muodonmuutoksia työstettäessä muovia. Tämän välttäminen saattaa hidastaa työstöä kohtuuttomasti. CNC-koneen terän asemointinopeus ei yleensä ole rajoite, vaan itse työstötapahtuma. Tästä syystä laserointi soveltuu porausta paremmin ilmakuristusten valmistukseen silloin, kun reikien lukumäärä on suuri.

Valaminen ohuiden lankojen avulla

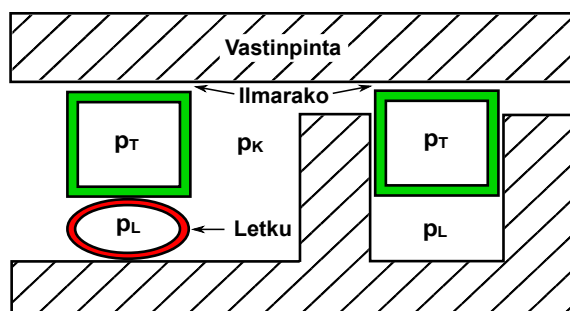
Epoksista valaminen on yksi mahdollisista aerostaattisen tiivisteen valmistusmenetelmistä. Ilmakuristukset valmistettaisiin tässä menetelmässä käyttäen apuna mikrokokoisia keernoja, jotka voisivat olla ohuita lankoja. Langat vedettäisiin tiivisteen valusta pois, kun epoksi on osittain tai kokonaan kovettunut. Jäljelle jäisivät halkaisijaltaan keernalankoja vastaavat ilmakuristukset. (Müller 1994)

Rako vastakkaisten pintojen välissä

Jos ilmareikien valmistukseen on tarjolla hyvin rajallisia valmistusmenetelmiä, kuristukset voidaan koota kahdesta kappaleesta, joiden pinnat asetetaan tiiviisti toisiaan vasten. Toisen kappaleen pintaan koneistetaan haluttua ilmakuristusta vastaavia syvennyksiä. Vastakkain asetettuna näiden kappaleiden välinen rako muodostaa ilmasuuttimen.

4.3.4 Tiivisteen kuorman säätö

Aerostaattinen tiiviste vaatii esikuormituksen toimiakseen ilmalaakerina. Esikuormituksen lisäksi vaaditaan tiivistettävän ilmakammion painetason perusteella määräytyvää ylimääräistä kuormaa, jonka suuruus riippuu tiivistekonstruktioista ja kuormitusmekanismista (ks. kuva 7.1, s. 70). Tiivisteen kuorman täytyy mm. edellä mainituista syistä olla säädettävissä. Säätömekanismi voi olla osa tiivisteen kiinnitystä tai tiivisteen ripustuksesta erillään. Työn aikana ideoitii tiivisteen kuormituksen säätöön pääasiassa kahdenlaista toimintaperiaatetta, jotka molemmat perustuvat paineilman käyttöön (Kuva 4.10).



Kuva 4.10: Tiivisteen kuorman säätö paineilmalla, vasemmalla kuormaletku ja oikealla erillinen painekammio kuorman säätöön. Tiivistepaine p_T , kuormituspain p_L ja tiivistettävän ilmakammion paine p_K .

Tiivisteen kuormituksen toimintaperiaatteeksi päätettiin valita paineistettu letku, sillä se on suoraviivaisesti johdettavissa konstruktioksi ja letkua on helposti saatavilla. Letkun tuottama voima on periaatteessa projektiopinta-ala kerrottuna paineella. Paineen vaikutuksen voimaan pitäisi olla siis jokseenkin lineaarinen. Käytännössä letkumateriaalin kimmo-kerroin, seinämänvahvuus, kitkakerroin ja mahdollinen kudosten olemassaolo vaikuttavat voiman hallinnan lineaarisuuteen. Tätä vaikutusta ei työssä selvitetty analyttisesti.

Tiivisteen esikuormitukseen voitaisiin ajatella myös kuormaletkusta erillistä voimantuottoa. Jos tiivisteen ripustus toteutettaisiin lehtijousilla, näillä voisi aikaansaada sopivan esijännityksen. Muita vaihtoehtoja voisivat olla esimerkiksi neodyymimagneetit tai sähkömagneetit muovitiivisteen sisällä. Sähkömagneeteilla voisi teoriassa toteuttaa kuorman säädön kokonaan ilman kuormaletkua. Etuna olisi tiivistekuorman muodostuminen tiivisteessä itsessään. Haittapuolena olisi magneettien taipumus kerätä metallipölyä ja muita mahdollisia työstöstä jääneitä partikkeleita, jotka saattaisivat häiritä tiivisteen ilmalaakeritoimintaa.

4.4 Tiiviste osana taipumakompensoitua telaa

Tässä työssä ei ratkaistu paineilmalla taipumakompensoituun telaan liittyviä erityisongelmia kuten radiaali- ja aksiaali tiivisteiden liitosta. Tasomaisella laakerilla ei voitu myöskään luoda vertailutilannetta taipumasta aiheutuviin vaipan geometrian muutoksiin. Telan taipumasta aiheutuva muodonmuutos on otettava huomioon suunniteltaessa aerostaattista tiivistystä telan sisälle. Tiivisteen ripustuksen on kyettävä mukautumaan vaipan ja kiinteän akselin taipumasta aiheutuvaan geometrian muutokseen.

4.4.1 Taipuman vaikutus

Telan taipumaan vaikuttaa pääasiassa kolme voimaa: paperiradan jännityksestä aiheutuva voima (T), nippikuormasta aiheutuva voima (N) ja telan massasta aiheutuva voima (G). Jos paperirata kulkee kahden kalanteritelan välistä ainoastaan viivakosketuksella, voima T voidaan olettaa nolllaksi. Jos paperirata kiertää telan kehän 180° peitolla, taipumaan vaikutta-

vien voimien resultantti on kaavan 4.14 mukainen. (Roikum 1996: 32)

$$\vec{W} = 2\vec{T} + \vec{N} + \vec{G} \quad (4.14)$$

Pallomaisilla laakereilla vapaasti tuetun pyörimättömällä keskiakselilla varustetun telan taipuma (keskeltä) voidaan laskea yksinkertaistetulla kaavalla (4.15), jossa w on viiva-kuorma. Kaavassa on oletettu, että päätylaakerien etäisyys toisistaan on suunnilleen samaa luokkaa kuin telan vaipan pituus L . Vaipan, ulkohalkaisijaltaan D ja sisähalkaisijaltaan d , jäyhyysmomentti lasketaan kaavalla 4.16. (Roikum 1996: 32)

$$\delta = \frac{5 w L^4}{384 E I} \quad (4.15)$$

$$I = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4) \quad (4.16)$$

Statiikan perussäännöistä seuraa se, että yhdensuuntaiset vastakkaiset voimat kumoavat toisensa. Siksi uivan telan tai paineilmalla taipumakompensoidun telan pluskammiossa vaadittavan paineen p_K laskenta on periaatteessa erittäin yksinkertaista (Kaava 4.17).

$$p_K = \frac{W}{d L} \quad (4.17)$$

4.4.2 Tiivisteen ripustus

Telan taipuma on käytännössä monimutkaisempi ilmiö kuin mitä edellisessä luvussa kuvailtiin. Tässä työssä taipuman vaikutuksista vaipan muodonmuutoksiin ei tehty syvällisempää analyysiä. Myöskään keskiakselin taipumaa ei käsitelty lainkaan. Taipuman vaikutus tiivisteen ripustuksen suunnittelussa on kuitenkin otettava huomioon.

Tavoiteltavaa olisi taipumakompensointijärjestelmän niin nopea reagointi, että kompensoinnin suuruus vastaisi jatkuvasti nippiä ja muita kuormia yhteensä. Tällöin vaipan muodonmuutokset ja siitä aiheutuvat tiivisteen ilmaraon muutokset pysyisivät jatkuva-aikaisesti minimissään. Tämä luonnollisesti edellyttäisi myös keskiakselin taipuman ottamista huomioon kammioitiivisteen kiinnityksen ja jousitusmekanismin suunnittelussa.

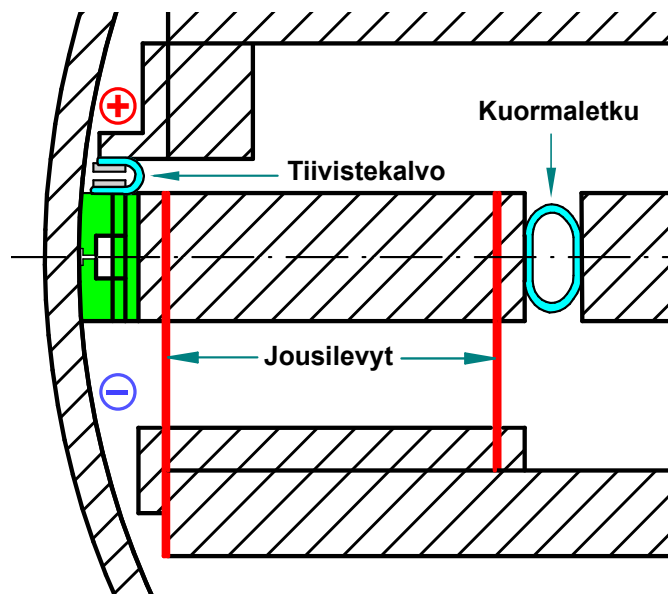
Teladynamiikka vaikeuttaa suunnittelua entisestään. Koska telan muodonmuutoksiin vaikuttaa suuri joukko erilaisia, myös dynaamisia tekijöitä, tiivisteen ripustuksen täytyy sallia jonkin verran joustoa. Mitä kovempaa tiivistemateriaalia käytetään, sitä enemmän tiivisteen kiinnityksen on joustettava. Ripustuksen täytyy silti mahdollistaa herkkä liike aerostaattisen pinnan normaalin suunnassa, jotta ripustuksesta ei aiheudu tiivisteen kuormituksen säätöä häiritsevää kuormaa.

Tiivisteen ripustukseen ideoitiin lehtijousia. Pareittain aseteltuna ne muodostavat nivelnelikulmion, joka on likimääräinen suoravientimekanismi. Lehtijousiparilla olisi mahdollista toteuttaa tiivisteelle kiinnitys, joka olisi kyllin jäykkä pysymään muodossaan kammio-paineen aiheuttamia voimia vastaan, mutta sallisi silti riittävän herkän liikkeen ilmakalvon normaalin suunnassa.

Riskinä lehtijousiparin käytössä saattaisi olla liian suuri jäykkyys, joka estäisi profiilin vääntymällä tapahtuvan tiivistepinnan mukautumisen vaipan muodonmuutoksiin. Ratkaisuja näihin ongelmiin ei selvitetty kokeellisesti, sillä mittauksia varten valmistettu koelaa-kerin tasomainen tiivistekonsepti ei tätä mahdollistanut. Jos kaksi lehtijoustusta osoittautuu liian jäykäksi, toinen jousilevy voidaan jättää pois.

Periaatteessa tiiviste voisi olla täysin vapaasti tuettu. Tämä edellyttäisi tiivisteen kuormituksen tuomista sellaiseen kohtaan tiivistettä, jossa tiivisteprofiilin vääntömomentin resultantti asettuisi nolleen. Ongelmana tässä olisi se, että painejakauman keskilinjän siirtyessä kammiopaineen ja tiivistepaineen suhteiden muuttuessa myös kuormitusmekanismin pitäisi mukautua tilanteeseen.

Näiden ongelmien vaikutuksia voitaisiin vähentää estämällä kammiopaineen pääsy kuormitusmekanismille asti, joka muuten joutuisi toimimaan myös tiivisteenä. Kuvassa 4.11 on esitetty jousilevyjen käyttö yhdessä kuormaletkun kanssa, joiden toiminnan häiriintyminen kammiopaineen vaikutuksesta estetään erillisellä pluskammion tiivistävällä kalvolla.



**Kuva 4.11: Pareittain asetellut jousilevyt sallivat taipumakompensoidun telan kammiotii-
visteelle vastinpinnan normaalin suuntaisen liikkeen. Tiivistekalvo estää paineen vaikutuksen
jousilevyjen ja kuormaletkun toimintaan.**

Luku 5

Koelaitteiston kuvaus

Tässä luvussa käydään läpi koelaitteiston tärkeimmät komponentit, ja kuvaillaan kokeessa käytetyn laakerin rakenne ja rakenneosien toimintaperiaatteet. Luvussa kuvataan myös mittausjärjestelmässä käytettyjen anturien ja toimilaitteiden ominaisuudet sekä selostetaan tiedonkeruujärjestelmän toimintaperiaate. Lopuksi käydään läpi se, miten mittaukset on suoritettu ja millä perusteilla mitattavat suureet on valittu.

5.1 Koelaakerin mäntätyyppinen aerostaattinen tiiviste

Tämän työn aikana valmistettiin yksi toimintakuntoinen aerostaattisilla tiivisteillä varustettu ilmakammioellinen laakeri mittauksia varten. Laakerin kammioapaine, tiivisteiden syöttöpaine ja tiivisteiden kuorma olivat erikseen säädettäviä. Laakerirunko suunniteltiin sellaiseksi, että sen avulla olisi tarvittaessa mahdollista testata myös muita laakerityyppejä.

Laakerirunkoon ei suunniteltu kiinnitystä pyörrevirta-antureille, joita aiemmissa ilmalaakeritutkimuksissa oli käytetty, sillä kiinnostuksen kohteena olevien ilmakammioellisten laakerien tiiviste sallii liikkeen suhteessa laakerirunkoon. Pyörrevirta-anturien käyttäminen olisi edellyttänyt niiden kiinnittämistä itse tiivisteeseen, mikä tällä konstruktiolla ei olisi ollut mahdollista. Tiivistepinnan lievä elastisuuskin tekee pyörrevirta-anturien soveltamisesta vaikeampaa ja epätarkempaa perinteisten ilmalaakerien mittaukseen verrattuna.

Materiaalina laakerirungossa, kammio-osassa ja tiivisterungossa käytettiin alumiinia (6082-T6). Tiivisteiden materiaalina käytettiin teknistä muovia, POM C. Valmistuksessa aihiona käytettiin 16 mm paksuista suulakepuristettua levyä. Laakerin ja tiivisterungon välinen liukupinta valmistettiin millimetrin paksuisesta teflonkalvosta (PTFE), jonka toinen pinta oli etsattu. Happokäsitelty pinta olisi ollut mahdollista liimata laakerirunkoon, mutta tätä ei katsottu välttämättömäksi laakerin toiminnan kannalta, sillä laakeriin oli koneistettu kaula liukupinnan pitämiseksi paikallaan.

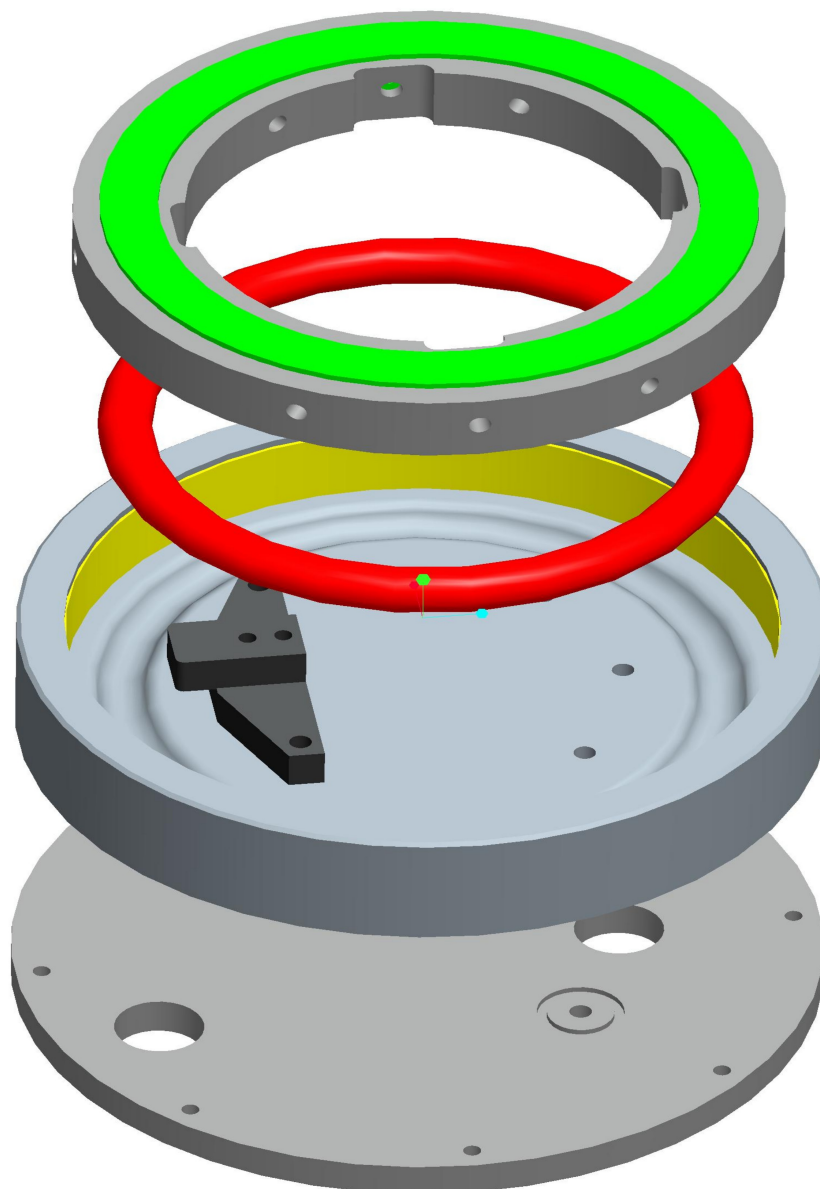
Kuormaletkun materiaalina oli silikonin, jonka liittämisessä ja tiivistyksessä käytettiin apuna Wacker Silicones Elastosil E41 -liimaa. O-renkaat (15x2) olivat materiaaaliltaan nitrilikumia (NBR 70). Paineilmaliittimien materiaalina oli messinki ja polybutyleenitereftalaatti (PBT), ja niiden tiivistemateriaalina oli PTFE. Paineilmaletkujen (Ø4 mm ja Ø6 mm) materiaalina oli polyuretaani (PU).

Kuvassa 5.1 on esitetty laakerin peruskomponentit. Alimpana kuvassa on laakerirunko, jonka alla on kuormitusakselin pallonivelen paikka, joka ei näy kuvassa. Seuraavana on

laakerin kammio-osa, jossa teflonkalvo on merkitty keltaisella ja tiivisterungon pyörimisen estävä reaktiotuki tummanharmaalla. Kuormaletku, joka käytännössä ensisijaisesti toimii tiivisterungon reaktiotukena myös pyörimisen estämiseksi, on merkitty punaisella värillä. Ylimpänä on alumiinirunkoinen mäntätiiviste, jossa POM-tiivistepinta on merkitty havainnekuvaan vihreällä värillä.

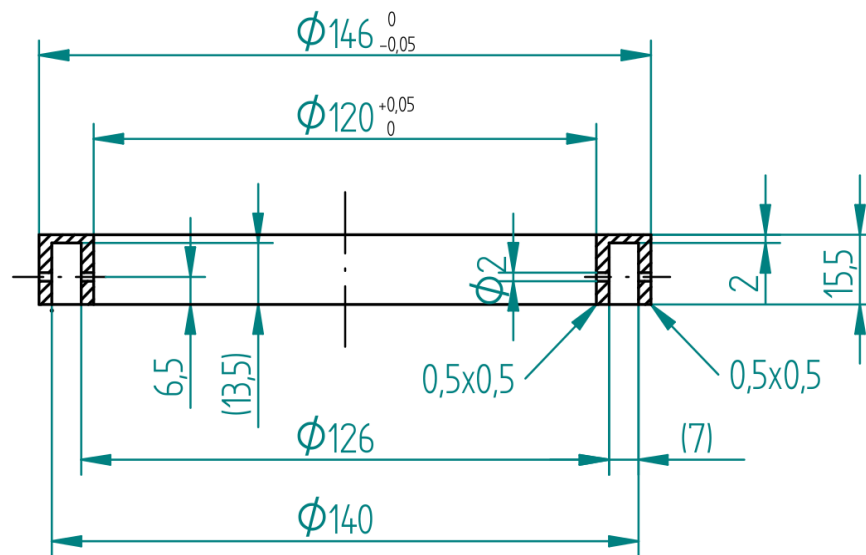
Yhdessä pallonivelen, laakerin kammio-osan liukupinnan ja kuormaletkun avulla tiiviste asettuu vastinpintaa vasten ja puristuu siihen tasaisella voimalla. Ilmakammion vuoksi laakerin jäykkyys on erittäin alhainen. Tästä syystä laakeri pitää käyttötilanteessa lukita paikalleen, sillä ilmakammioon varastoituneen energian vuoksi laakerilla on taipumus toimia aerostaattisena tunkkina. Sorvin avulla mittauksia suoritettaessa laakerin lukitseminen tapahtuu ison ja pienen kelkan avulla. Pallonivelelle akseleineen sallitaan vain voima-anturin suuntainen liike. Laakerille sallitaan liike vain pallonivelen kiertymän suhteen ja pieni voima-anturin sallima liike.

Mäntätiivisteelle sallitaan liike myös laakerin suhteen. Käytännössä kuormaletku yhdessä tiivistepinnan puristuskalvon jäykkyyden ja vaimennuksen avulla asemoi tiivisteiden laakerin vastinpinnan suuntaisesti myötäillen vastinpinnan liikkeitä siten, että mäntätiiviste pääsee liukumaan laakerin kammio-osan teflonkalvoa pitkin. Kuormaletku toimii myös jousena. Kuormitusletku on Ø12 mm silikonilettoa, jonka seinämävahvuus on 2 mm. Se on liimattu Ø133 mm renkaaksi. Kuormaletkulle on koneistettu ura laakerin kammio-osaan. Kammion oletettiin tiivistyvän laakerin sisäpuolelta kuormaletkun toimiessa O-renkaan kaltaisena tiivisteinä silloin, kun laakeria kuormitetaan riittävän suurella voimalla.

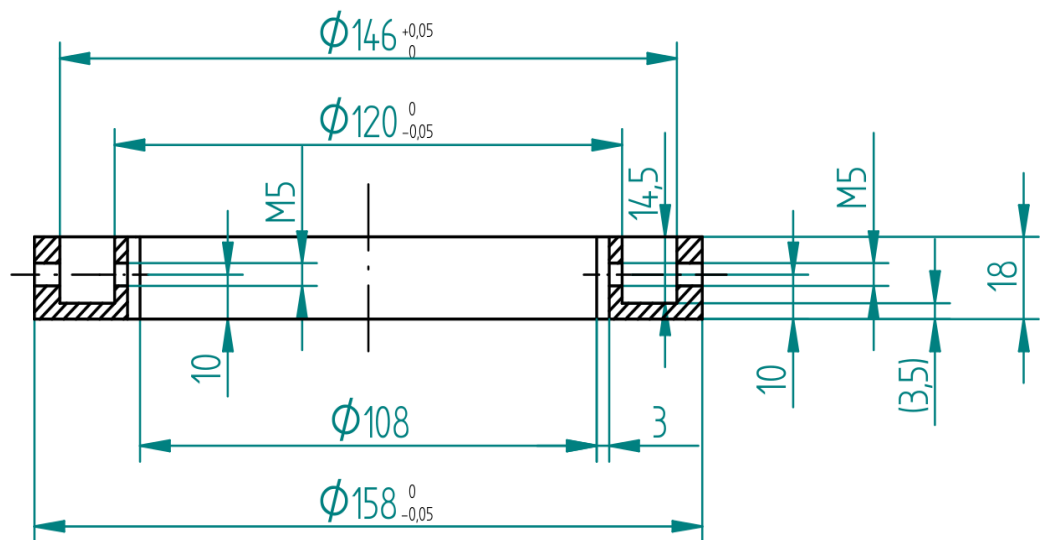


Kuva 5.1: Kokeessa käytetyn ilmalaakerin räjäytyskuva.

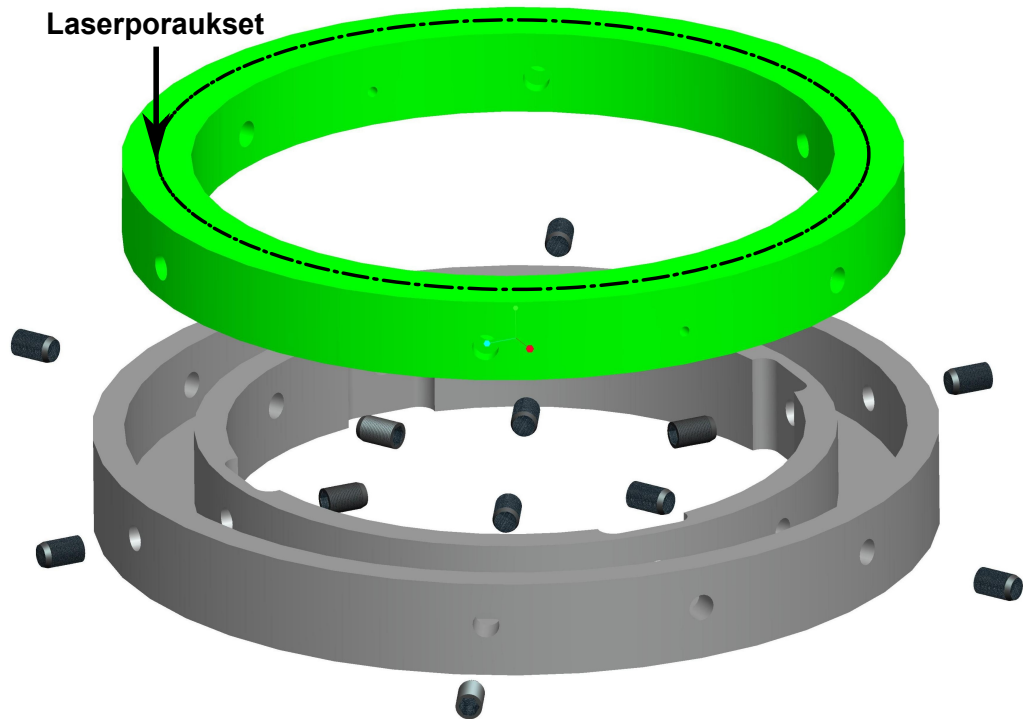
Tiiviste koostuu kahdesta ympyrämaisestä U-profiilista, jotka vastakkain asetettuna muodostavat tiivisteelle sisäisen ilmakammion. Profiilien mitat on esitetty kuvissa 5.2 ja 5.3. Tiivistepinnan pysyminen kiinni tiivisterungossa on varmistettu 8 mm M5-pidätinruuveilla, joita on 12 kappaletta. Nämä on esitetty kuvan 5.4 tiivisteiden räjäytyksessä. Tiivisteiden ilmatiiviys on lisäksi varmistettu tiivistepinnan ja tiivisterungon välisellä liimalla (Pattex Liquid) sekä pidätinruuvien kierteisiin lisätyllä teflonteipillä.



Kuva 5.2: POM-tiivisteän poikkileikkauksen päämitat.



Kuva 5.3: Tiivisteän alumiinirungon poikkileikkauksen päämitat.

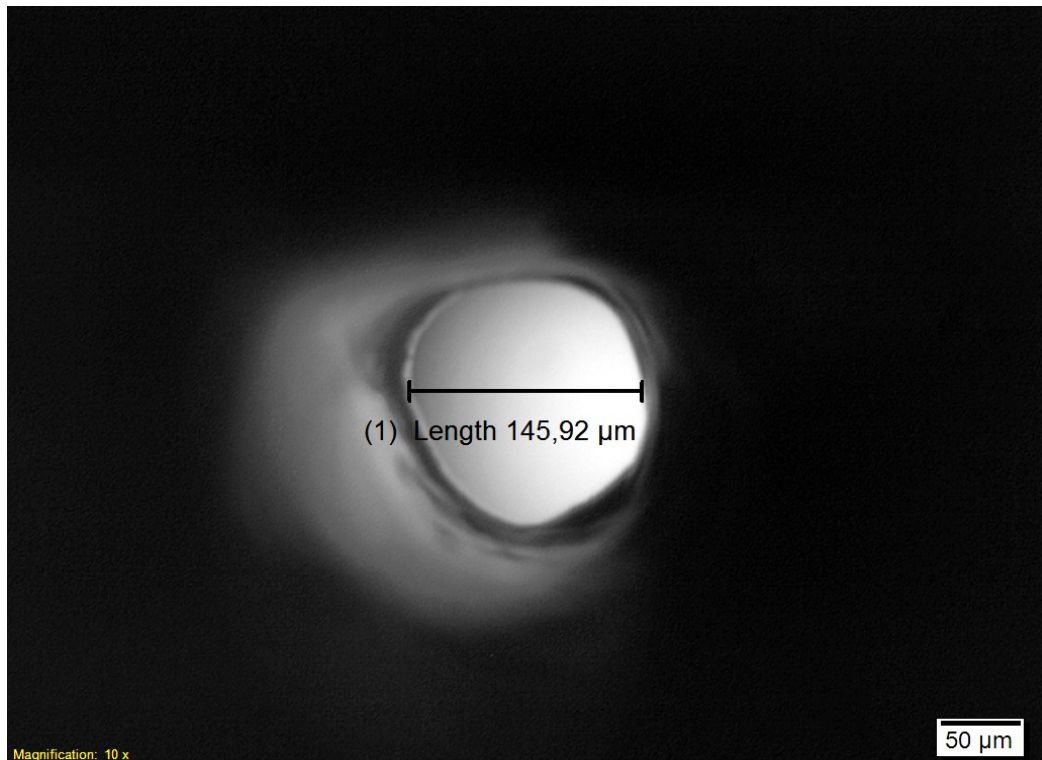


Kuva 5.4: Koelaakerin aerostaattisen mäntätyyppisen tiivisteiden räjäytys.

Ennen kuin laakeria ja tiivistettä päästiin kokoamaan, POM-muovista valmistettu tiiviste-pinta rei'itettiin Shenshui Laser SH1290 -laitteella, joka perustuu 75 W tehoiseen CO₂-laseriin kuten myös alustavissa testeissä käytetty Epilog. Laitetta käytetään paperin sekä muovi- ja vanerilevyjen leikkaukseen, ja se soveltuu myös maksimissaan noin 5 mm paksuisten muovilevyjen poraukseen.

Laserin parametrit optimoitiin 3 mm paksuisen POM-levyn avulla siten, että rei'istä tuli silmämääräisesti valoa vasten katsottuna mahdollisimman siistin ja tasalaatuisen näköisiä. Paksuudeltaan 2 mm tiivistepinnan laseroitujen ilmareikien jakoympyrän halkaisija on Ø133 mm. Reikien halkaisija on keskimäärin Ø152 µm (otoskoko n = 16) ja niitä on tiivisteessä 36 kappaletta noin 11 mm etäisyydellä toisistaan. Reikien halkaisijan keskihajonta on $\sigma_x = 13,5 \mu\text{m}$.

Reikien tasaisen laadun ja halkaisijan pienen vaihteluvälin perusteella voitiin olettaa painejakauman vaihtelu tiivisteiden kehän suunnassa vähäiseksi. Mikroskoopin avulla tallioitu kuva 5.5 esittää tiivisteiden tyypillistä laseroitua reikää. Keskiarvo ja keskihajonta laskettiin vastaavien mikroskooppikuvien (n = 16) perusteella.



Kuva 5.5: Mikroskooppikuva tiivisteiden laserporatusta reiästä lasersäteiden ulostulon puolelta kuvattuna ja tarkennettuna sisääntulon pienimmän halkaisijan kohdalle.

Laakerin ja tiivisteiden kokoonpanon jälkeen havaittiin, että laakeri ei toimi tyydyttävästi ilmalaakerina, jotta mittauksia voitaisiin suorittaa. POM-muovinen tiiviste oli joutanut koneistuksessa. Tiivisteiden ilmalaakeripinnalle ei myöskään oltu ennen koneistusta asetettu toleransseja eikä vaatimuksia pinnanlaadulle. Oletettiin, että sorvattu pinta olisi automaattisesti ollut riittävän mittatarkka ilmalaakeripinnaksi, koska työstö tapahtui tiivisteiden kehän suunnassa siten, että työstöjäljet olivat tiivistepinnan käytönaikaista painegradienttia vastaan kohtisuorassa.

Tiivistepinta ei kuitenkaan ollut ilmalaakeriksi riittävän mittatarkka. Se hiottiin suoraksi kiinnittämällä mittauksia varten tarkoitettuun vastinpintaan ensin hiomapaperi karkeudeltaan P400 ja pyörittämällä vastinpintaa käsin sorvissa. Hionnan aikana tiivisteessä ylläpidettiin syöttöpainetta, jotta laseroidut reiät eivät menisi tukkoon. Pinta viimeisteltiin vielä hiomapaperin karkeudella P1200.

Tämän jälkeen tiivisteiden pinnankarheudeksi mitattiin Taylor-Hobson Surtronic 3 -laitetta apuna käyttäen Ra 0,17 (keskiarvo näytekoolla $n = 20$). Mikrometrillä todettiin pinnan paksuusvaihtelun olevan alle mikrometrin luentatarkkuuden eli alle 10 μm . Oletettiin, että nyt olisi mahdollista saavuttaa ilmaraon korkeudessa Theskan (2004) suositus 5...15 μm . Tiivisteiden todettiin alustavasti toimivan ilmalaakerina ja seuraavaksi voitiin suorittaa mitaukset.

5.2 Mittausjärjestelmä

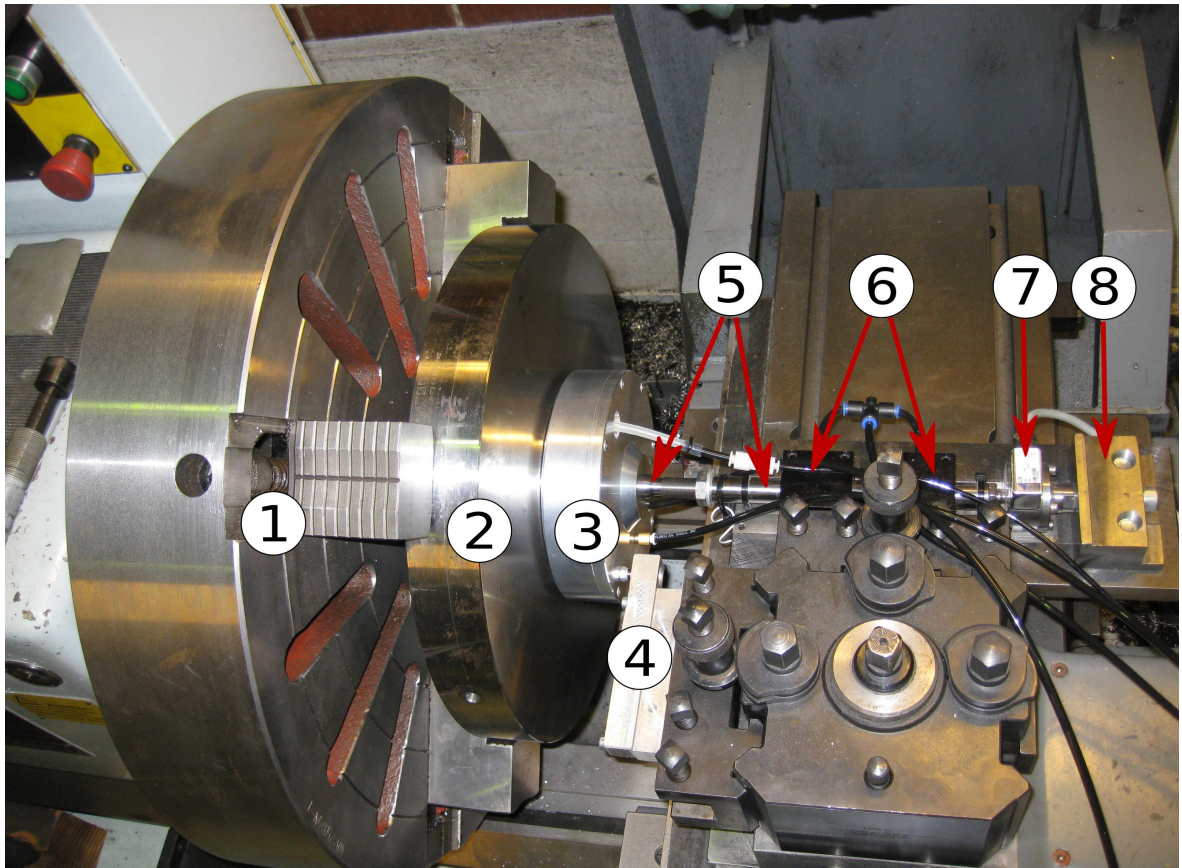
Tasomaisia ilmalaakereita testattaessa olisi luontevaa asettaa vastinpinta vaakatasoon. Erillisiä punnuksia käyttämällä painovoimaa voitaisiin hyödyntää kuorman säätöön eikä erillistä voima-anturia välttämättä tarvittaisi. Tällaisella koejärjestelyllä kuormitus kohdistuisi laakeriin tasaisesti. Vastinpinnan vaakatasoon asettamisen mahdollistavaa testipenkkiä ei kuitenkaan ollut tarjolla mittausten suorittamista varten.

Aiemmissa ilmalaakerikokeissa oli käytetty apuna Neuvostoliitossa valmistettua 1M65-5 -kärkisorvia, joka suuren kokonsa ansiosta oli todettu erittäin tukevaksi mittausjärjestelmän rungoksi. Kyseistä sorvia ei enää ollut käytettävissä, mutta sorvin hyödyntämistä pidettiin yleisesti hyvänä ajatuksena, vaikka vastinpinta jouduttiinkin kiinnittämään pystysuoraan asentoon. Vastinpinta, laakeri ja voima-anturi päätettiin mittauksia varten kiinnittää pienempään TOS 63C -sorviin.

Mittausjärjestelmäksi valittiin Matlabin, Simulinkin ja xPC Target -reaaliaikakäyttöjärjestelmän yhdistelmä. Mittaukset suoritettiin siten, että Simulink-ohjelmalla luotiin mittaus- ja ohjausmalli, jota ajettiin reaaliaikakäyttöjärjestelmän orjakoneella. Anturit ja toimilaitteet kytkettiin National Instruments PCI-6259-mittakortin avulla xPC Target -orjakoneeseen.

5.2.1 Testipenkki

Mittausjärjestelmän runkona käytettiin TOS 63C -kärkisorvia. Sen pienempää kelkkaa oli mahdollista käyttää apuna voiman säätämiseen. Isompi kelkka lukittiin sorvin aksiaalisuunnassa väliaikaisesti paikalleen, koska kelkan syötön vaihde piti mittauksia suoritettaessa asettaa vapaalle. Sorvia normaalisti koneistuksessa käytettäessä syötölle asetetaan vaihdelaatikosta välitys, joka estää kelkan epämääräiset liikkeet. Koelaakerin kiinnitys sorviin on esitetty kuvassa 5.6.



Kuva 5.6: Koelaakerin kiinnitys sorviin,
1. Sorvin pakka 2. Laakerin vastinpinta 3. Koelaakeri 4. Laakerin pyörimisen esto
5. Pallonivel akseleineen 6. Akselin ilmalaakerit 7. Voima-anturi 8. Akselin reaktiotuki.

Vastinpintana käytettiin 50 mm paksuista halkaisijaltaan Ø400 mm teräskiekkoa. Vastinpinnan aksiaaliheitto kalibroitiin mittakellon avulla pyörittämällä vastinpintaa sorvissa ja lukemalla mittakellosta aksiaaliheiton minimi- ja maksimiarvot teräskiekon reunan läheltä etäisyydellä 185 mm vastinpinnan keskilinjalta. Näiden maksimien ja minimien kohdalla kiekkoa naputeltiin kumivasaralla kunnes heitto saatiin minimoitua. Lopulliseksi aksiaaliheitoksi jäi noin 20 µm.

5.2.2 Käytetyt anturit ja toimilaitteet

Mittakortti ja kytkennät

Tiedonkeruu- ja ohjausjärjestelmän analogia-digitaali ja digitaali-analogia -muuntimena käytettiin mitta-PC:n korttipaikkaan asennettua National Instruments PCI-6259-mittakorttia. Se oli yhteensopiva xPC Target -reaaliaikakäyttöjärjestelmän kanssa. Mittakorttiin liitettiin National Instruments CB-68LPR-kytkentälevy anturien ja toimilaitteiden johdotuksien varten. Johdotuksina käytettiin kierrettyjä parikaapeleita, jotka mahdollistivat anturien lukemisen differentiaalikytkennöillä.

Tässä työssä kytkennän laadulla ei johdotusten lyhyen pituuden vuoksi luultavasti ollut kovinkaan suurta merkitystä. Kuitenkin yleisesti ottaen kierrettyjen parikaapelien käyttäminen differentiaali kytkennällä tarjoaa häiriöitä vastaan erittäin hyvin suojatun signaalin siirtotien, ja on siten suositeltu kytkentätapa.

Voima-anturi

Kaikki anturit ja toimilaitteet toimivat 24 V jännitteellä, joten komponenteille riitti yksi Murr Elektrik Evolution -virtalähde. Poikkeuksen muodosti voima-anturi, jolle oli oma virtalähde (HBM NT 101 A). Voima-anturin tyyppi oli HBM U2B. Sen mitta-alue oli 0...5 kN. Voima-anturi vaati toimiakseen erillisen vahvistimen (HBM AE 100), joka piti kalibroida vastaamaan käytettyä voima-anturia.

Kalibrointi suoritettiin säätämällä vahvistimen nollakohdan ja vahvistuksen potentiometrejä. Nollakohta etsittiin ilman anturin kuormitusta käyttämällä apuna tarkkaa Fluke-yleismittaria. Vahvistus kalibroitiin tunnetun voiman avulla käyttäen Fluke-yleismittaria. Voima-anturi liitettiin sorvin työkalukiinnitykseen siten, että pallonivelen akseli oli laakeroitu kitkattomasti kahdella radiaali-ilmalaakerilla voima-anturiin. Näin voima-anturista tuli paitsi erittäin herkän myös toistettavan luonteinen.

Paineilmatoimilaitteet ja mittarit

Mittaajärjestelmän paineilman puhtaudesta huolehdittiin samankaltaisella järjestelyllä, jota aiemmissakin ilmalaakerikokeissa oli käytetty. Ilmansuodattimena toimi SMC AF20. Öljy- ja hiukkassuodattimena toimivat SMC AFM20 ja SMC AFD20. Järjestelmän syöttöpaine alennettiin noin 5 bar tasolle SMC AR20 -paineenlenninventtiilillä.

Koelaakerin paineiden regulointiin käytettiin kolmea erillistä paineilmaregulaattoria, joista kaksi oli sähköisesti ohjattavia. SMC:n käsisäätimeen oli kytketty SMC ISE4-01-26 paineanturi. Käsisäätimellä reguloitavaa kohdetta muutettiin mittausten aikana tarpeen mukaan. Pääosin mittaukset tehtiin kuitenkin pitämällä tiivisteen syöttöpaine vakioarvossa 3,5 bar. Tällöin ilma tiivistelle kulki käsisäätimen kautta.

Tiivisteen sisäistä painetta tarkkailtiin lisäksi erillisellä SMC:n PSE540-01-paineanturilla hyvin läheltä tiivistettä. Kuormitusletkun painetta säädettiin Feston VPPM-6L-L-1-G18-0L6H-V1P-S1C1-paineilmaregulaattorilla noin 2 m etäisyydeltä laakerista. Kuormaletkun virtauksen ollessa lähes kaikissa tilanteissa nollatasolla etäisyydellä ei ollut mittausten kannalta merkitystä. Laakerin kammiopainetta säädettiin SMC:n ITV1050-31F1CL3 -paineilmaregulaattorilla noin 2 m etäisyydellä laakerista. Ilmansyöttö oli mitoitettu siten, että tästä etäisyydestä ei tulisi laakerin virtaustasoilla merkittävää painehäviötä.

Koelaakerin ilmankulutuksen mittaukseen käytettiin kahta SMC:n valmistamaa virtausmittaria. Kammion ilmankulutusta mitattiin PFM710-C6-E-mittarilla, jonka mitta-alue oli

valmistajan ilmoittamana 0,2...10 l/min (todellisuudessa 0...10 l/min). Tiivisteen ilmankulutusta mitattiin PFM711-C6-E-mittarilla, jonka mitta-alue oli 2...100 l/min (0...100 l/min). Valmistaja ei lupaa mittarien olevan tarkkoja mitta-alueilla 0...0,2 l/min ja 0...2 l/min.

Kammion ilmankulutuksen mittaukseen valittiin kapeammalla mitta-alueella oleva mittari, koska kammion ilmankulutus oletettiin paljon pienemmäksi kuin tiivisteen ilmankulutus. Oletus tehtiin perustuen laakerikonstruktion alkuperäiseen suunnitelmaan siitä, että tiivisteen syöttöpaine pidettäisiin suurempana kuin kammiopaine. Tällöin kammion vuoto olisi teoriassa nollassa, jos muita vuotoja ei olisi. Tiiviste puolestaan vuotaisi myös kammion puolelle silloin, kun tiivistepinnan paine olisi suurempi kuin laakerin kammiopaine.

5.2.3 Mittausmalli

Mittaustietokonetta, johon PCI-6259 -mittakortti on kytketty, ajetaan xPC Target -reaaliaikakäyttöjärjestelmällä, joka on ns. kovaan reaaliaikaisuuteen kykenevä käyttöjärjestelmä. Reaaliaikaisuuteen viitataan sillä, että tehtävälle on annettu ensimmäinen ja viimeinen sallittu toteutumis aika. Reaaliaikaisuus voidaan jakaa kovaan, lujaan ja pehmeään reaaliaikaisuuteen (Ovaska et al. 2012). Kova reaaliaikaisuus tarkoittaa sitä, että annetut aikarajat ovat ehdottomia. Mittausjärjestelmälle tämä on eduksi mittaustulosten oikeellisuuden varmistamiseksi ja useista eri antureista saatavan datan synkronoimiseksi keskenään.

Mittaustietokonetta, jota voidaan tässä kutsua myös orjakoneeksi, voidaan hallita Matlabin käyttöliittymän avulla. Orjakoneen reaaliaikakäyttöjärjestelmässä ajettava mittausmalli luodaan Simulink-mallin avulla. Malli käännetään suoritettavaksi binääritiedostoksi ja siirretään orjakoneelle. Mittaustuloksia voidaan käsitellä orjakoneella tai siirtää verkon yli isäntäkoneelle, jossa niitä voidaan käsitellä monipuolisemmin Matlab-ohjelman avulla.

Mittakortti toimii analogi-digitaali - ja digitaali-analogi -muuntimena, jolla antureilta saatava signaali muutetaan mittausmallin hyödynnettävissä oleviksi numeroarvoiksi, ja vastaavasti mittausmallin ajosta voidaan syöttää ohjaussignaaleja toimilaitteille kuten paineilmaregulaattoreille. Mittakortin tulot ovat voima-anturilta, virtausmittareilta, paineantureilta ja paineregulaattorien valvonta-antureilta luetut signaalit. Mittakortin lähdöt ovat kammiopaineen ja kuormaletkun paineen ohjaukseen käytetyt arvot paineilmaregulaattorien ohjaussignaaleiksi.

Valtaosa työn mittauksista suoritettiin kuvassa 5.7 esitetyn mittausmallin avulla siten, että tiivisteen syöttöpaine oli ohjattavissa käsisäätöisellä paineilmaregulaattorilla. Mallia ei käydä tässä yksityiskohtaisesti läpi, sillä se sisältää paljon jännitearvojen skaalauksia ja muita vastaavia anturi- ja toimilaittekohtaisia yksityiskohtia.

ilmanvirtauksella. Mittarit tuntuivat alustavissa testeissä reagoivan herkästi pieniinkin ilmavirtauksiin eikä epätarkkuutta voitu vahvistaa, joskaan ei hylätäkään sellaisen mahdollisuutta.

Paineanturien ja regulaattorien valvontajännitteen luenta tapahtui virtausmittarien signaalin luentaa vastaavasti jännitealueen ollessa 1...5 V. Poikkeuksen muodosti Feston paineilma-regulaattori, jonka antaman signaalin jännitealue oli 0...10 V.

Paineilmaregulaattorien ohjaus

Molempien työssä käytettyjen paineilma-regulaattorien ohjausjännite oli välillä 0...10 V. SMC:n regulaattorilla se vastasi painetta välillä 0...10 bar ja Feston regulaattorilla painetta välillä 0...6 bar. Jo alustavissa testeissä havaittiin, että kuormaletkun painetta täytyy lisätä suhteessa laakerin kammiopaineeseen. Jo ensimmäiseen mittausmalliin tehtiin kuormaletkun paineelle yksinkertainen korjaus, joka lisäsi kuormaletkun paineeseen aloituspaineen lisäksi kammiopaineen 0,5-kertaisesti.

5.2.4 Suoritetut mittaukset

Mittauksia luettiin 1 kHz näytteenottotaajuudella. Tämä oli mitatun järjestelmän toimintaan suhteutettuna hieman ylimitoitettua. Suurehkosta näytteenottotaajuudesta ei kuitenkaan katsottu aiheutuvan haittaa, sillä sekä orjakoneessa ajettu reaaliaikakäyttöjärjestelmä että mittauksen ohjaukseen käytetty Matlab-ohjelmalla varustettu tietokone pystyivät käsittelemään datavirtaa ongelmitta. Mittauksia luettiin tallentaen kaikki ajon aikana kertynyt mittausdata kaikista mittakortin AD-muuntimen kanavista.

Alussa osa mittauksista suoritettiin manuaalisesti keräämällä mittaustuloksia yksittäisistä mittauspisteistä. Näin toimittiin siitäkin syystä, että näissä mittauksissa säädettiin voimaa ja siirtymää sorvin pienen kelkan käsiruuvia pyörittämällä. Lisäksi tarvittiin kuulo-, näkö- ja käsituntumahavaintoa tiivisteiden kosketuksesta vastinpintaan.

Aluksi selvitettiin, miten silikoniletkun avulla voidaan säätää tiivisteiden kuormaa. Tämän jälkeen tutkittiin tiivisteiden toimintaa aerostaattisena laakerina koko laakerin kammiopaineen ollessa 0 bar. Seuraavaksi tiivisteelle haettiin maksimaalinen kuorma, jolla se vielä toimi ilmalaakerina. Tämä kuorma tulisi määrittämään testatulla laakerikonstruktiolla epäsuorasti myös maksimin kammiopaineen.

Alustavien mittauksen jälkeen laakerin kokonaistoiminnan mittaukset suoritettiin skriptillä (Listaus 5.1), joka kasvattaa kammiopainetta välillä 0...1,92 bar. Tämä vastaa mitattua voimaa suunnilleen välillä 300...3000 N.

Listaus 5.1: Koelaakerin yhden kulutusmittaussarjan suorittava Matlab-skripti.

```
% Käynnistetään xPC, kammiopaineeksi aluksi 0 bar ja kuormaletkulle 0,7 bar
+tg;
tg.setparam(tg.getparamid('Kammiopaineen ohjaus (bar)', 'Value'), 0.0);
tg.setparam(tg.getparamid('Kuormaletkun ohjaus (bar)', 'Value'), 0.7);

% Odotetaan paineiden tasaantumista
pause(1);

% Asetetaan maksimi kammiopaine (bar) ja viive (s)
Pmax = 1.92;
wait = 0.2;

% Pyyhkäistään 0,01 bar askelin kammiopaine välillä 0...Pmax
for P = 0.0: 0.01: Pmax
    tg.setparam(tg.getparamid('Kammiopaineen ohjaus (bar)', 'Value'), P);
    pause(wait);
end

% Kammiopaine takaisin nolleen ja sammutetaan xPC
tg.setparam(tg.getparamid('Kammiopaineen ohjaus (bar)', 'Value'), 0.0);
-tg;

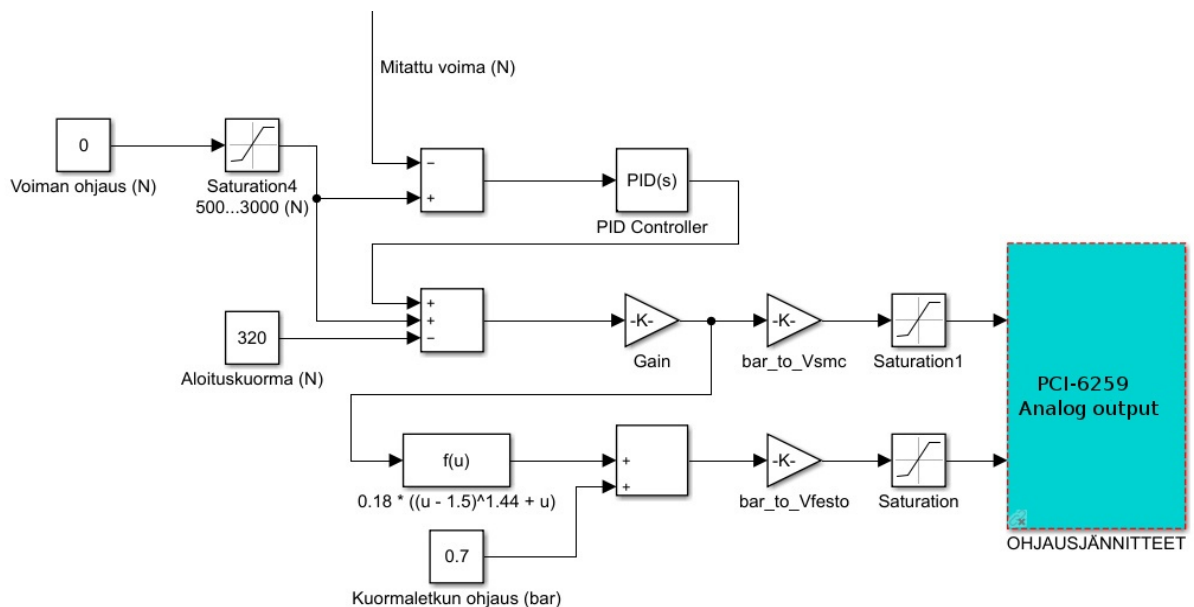
% Luodaan kuvaaja
figure1 = figure;
axes1 = axes('Parent', figure1);

% Piirretään kuvaajaan virtauksien käyrät voiman funktiona
plot(tg.OutputLog(:, 1), [tg.OutputLog(:, 2) tg.OutputLog(:, 3)])
xlim(axes1, [300 3000]);
ylim(axes1, [0 15]);
grid on;
xlabel('Voima (N)');
ylabel('Virtaus (l/min)');
legend('Tiivistete', 'Kammio');
```

Kuormaletkun ja tiivisteen yhteistoiminnan perusteella mittamalliin tehtiin kompensointi kuormaletkun paineelle kammiopaineen funktiona. Ensimmäisessä mallissa käytetty kompensointi, lineaarinen 0,5-kertainen lisä kuormaletkun paineelle kammiopaineen funktiona, korvattiin kaavan 5.1 mukaisella kokeellisesti saadulla funktiolla. Tällä mallilla haettiin vielä laakerin toiminnan raja-arvoja kuormaletkun paineelle. Kaikki suoritettut mittaukset on listattu taulukossa 5.1.

$$f(u) = 0,18 \cdot ((u - 1,5)^{1,44} + u) \quad (5.1)$$

Lopuksi mittausmallia muutettiin siten, että laakeria voitiin käyttää voimatoimilaitteena. Tämän mallin avulla suoritettiin laakerin askelvastemittaukset. PID-säätimen osuus mittausmallissa on esitetty kuvassa 5.8. Koejärjestelyä ei oltu optimoitu näitä kokeita varten. Vasta kun tiivistereunalla varustettu kammiollinen laakeri oli olemassa, ja laakerin toimivuus muissa mittauksissa oli todennettu, voitiin ajatella tällaisen mittauksen suorittamista, koska oltiin kiinnostuneita siitä, miten kammiollista laakeria voitaisiin käyttää nippikuorman tai taipumakompensoinnin voimakkuuden säätöön. Tavallisilla laakereilla oltaisiin kiinnostuneempia siitä, miten laakeri vastaa ulkoisen kuorman muutokseen tai pakkosiirtymään.



Kuva 5.8: PID-säätimen sisältävä osa parannetusta mittausmallista, jolla testattiin koelaakerin toimintaa voimatoimilaitteena.

Taulukko 5.1: Koelaakerilla suoritettut mittaukset ja mitatut suureet.

Mittaus	Suureet	Kuva
Kuormaletku		
- Voima paineen funktiona	p_L, F	6.1
- Voima puristuman funktiona	x, F	6.2
Tiiviste ilmalaakerina		
- Ilmasuuttimien vapaavirtaus	p_T, Q_T	6.3
- Ilmalaakeritoiminnan raja-arvot	p_T, Q_T	6.4
- Tiivistekuorman ja kuormapaineen suhde	F, p_L	6.5
- Tiivisteiden virtaus kuorman funktiona	F, Q_T	6.6
Tiivisteiden ja laakerin yhteistoiminta		
Laakeri vastinpinnan keskellä, kallistuma 0°		
- Ilmankulutukset laakerikuorman funktiona	F, Q_T, Q_K	6.7
- Konaisilmankulutus	F, Q	6.8
- Kulutuksista johdettu paineilmateho	F, P	6.9
Laakeri 100 mm vastinpinnan keskilinjalta, kallistuma 0°, ilmankulutukset	F, Q_T, Q_K	6.10
Laakeri vastinpinnan keskellä, kallistuma 0,06°, ilmankulutukset	F, Q_T, Q_K	6.11
Laakeri 100 mm vastinpinnan keskilinjalta, kallistuma 0,06°, ilmankulutukset	F, Q_T, Q_K	6.12
Tiivisteiden alkukuorman vaikutus (100 mm keskilinjalta, kallistuma 0°)	F_0, F, Q_T, Q_K	6.13
Paranneltu mittamalli, laakeri vastinpinnan keskellä, kallistuma 0°		
- Ilmankulutukset	F, Q_T, Q_K	6.14
- Tiivisteiden alkukuorman vaikutus	F_0, F, Q_T, Q_K	6.15
Askelvasteet laakerin ollessa voimatoimilaitteena	t, F	6.16

Luku 6

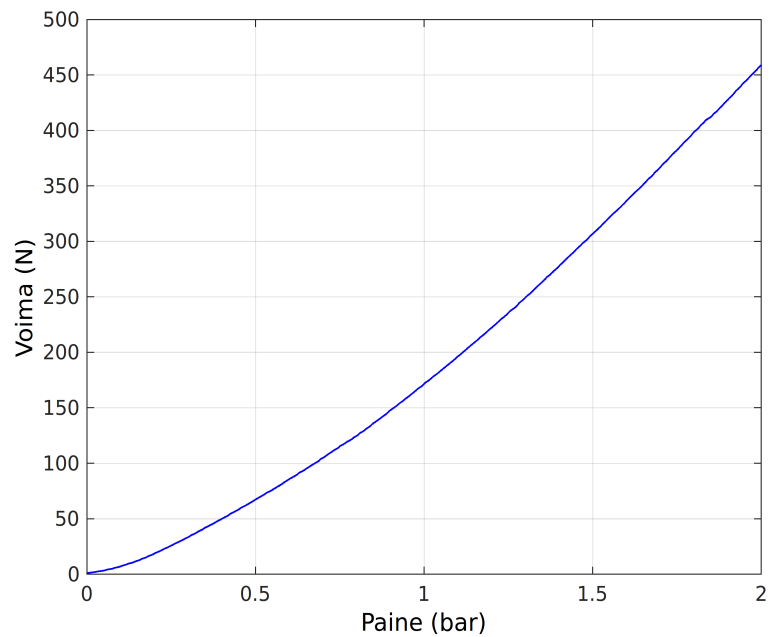
Mittaustulokset

Tässä luvussa esitetään koelaakerin mittaustulokset, jotka käsittävät kuormitusletkun toimintaa selvittävät tulokset, tiivisteiden toiminnan aerostaattisena laakerina sekä koko laakerin toimintaa kartoittavat mittaustulokset. Suurin osa tuloksista perustuu staattisiin mittauksiin. Luvun lopussa esitetään mittaustulokset, joiden avulla koelaakerin, tai pikemminkin koko koelaitteiston dynamiikkaa voidaan havainnoida.

Kaikki mittaukset suoritettiin Koneensuunnittelun laboratorion K4-telahallissa, jonka sisäilman lämpötila oli 20 °C. Hallin ilmanpaineella ei katsottu olevan merkitystä mittaustuloksiin, joten sitä ei mitattu. Paineilman meno- ja tulolämpötiloja ei myöskään katsottu tarpeelliseksi mitata, koska niiden ero oletettiin niin pieneksi, ettei tämän perusteella oltaisi pystytty vetämään järkeviä laakerin toimintaan liittyviä johtopäätöksiä.

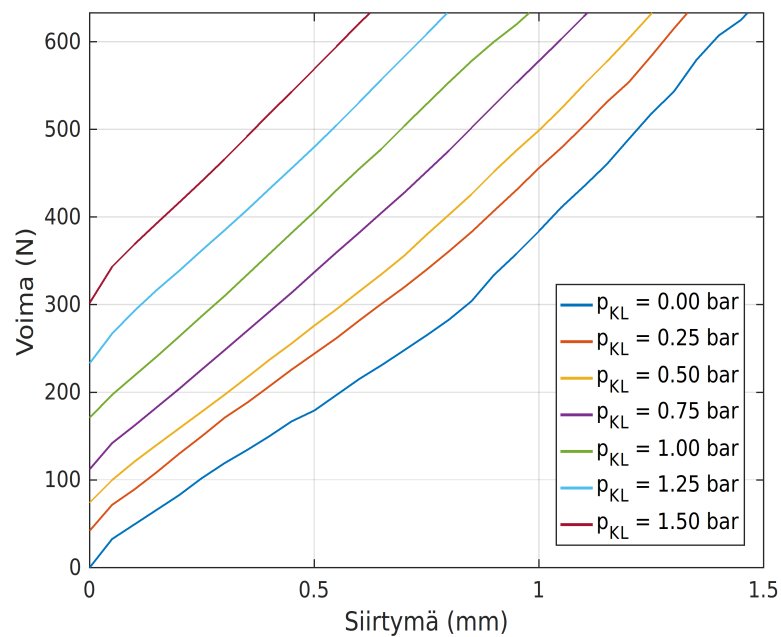
6.1 Kuormitusletku

Testilaakerin kuormitusletkun paineen vaikutus tiivisteiden kuormaan on esitetty kuvassa 6.1. Mittaus suoritettiin puristamalla laakeria vastinpintaan aluksi sellaisella voimalla, että tiiviste asettuu vastinpinnalle tasaisesti kuormaletkun paineen ollessa 0 bar. Tämän rihtausvoiman suuruus oli 130 N. Tätä asemaa käytettiin mittauksessa voiman nollakohtana. Paineen vaikutus voimaan kyseessä olevalla silikoniletkulla ja mitatulla laakerikonstruktiolla on potenssifunktio. Jousivakio tietyllä painetasolla saadaan linearisoimalla käyrää tietyn toimintapisteen kohdalla.



Kuva 6.1: Kuormitusletkun tuottama voima paineen funktiona.

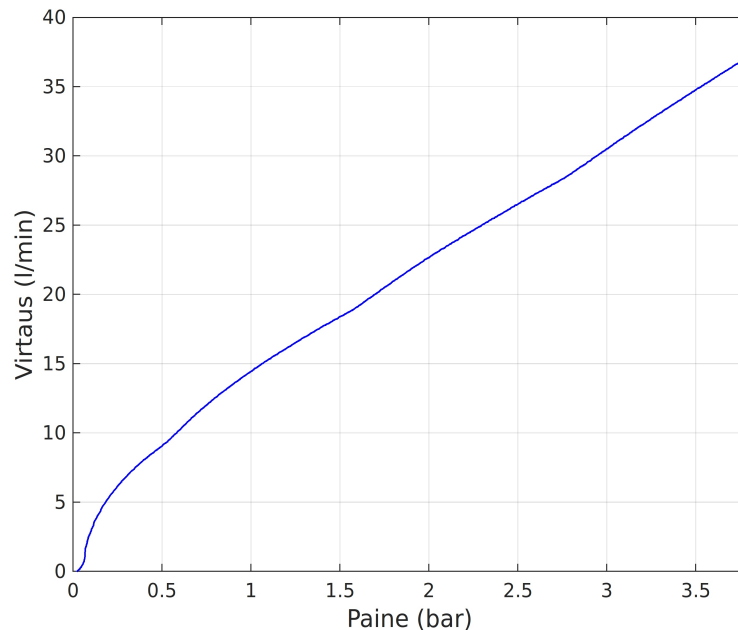
Mittakellolla laakerirungosta mitatun mäntätiivisteen siirtymän ja samalla kuormitusletkun puristuman vaikutus voimaan kuormitusletkun eri paineilla on esitetty kuvassa 6.2. Kuormaletku alkaa toimia lineaarisena jousena, kun sillä on painetta vähintään 0,75 bar. Kuvaajan perusteella laskettu kuormaletkun jousivakio $k = 455 \text{ N/mm}$, kun paineeksi on asetettu 0,75 bar.



Kuva 6.2: Kuormitusletkun tuottama voima eri paineilla letkun puristuman funktiona.

6.2 Tiiviste ilmalaakerina

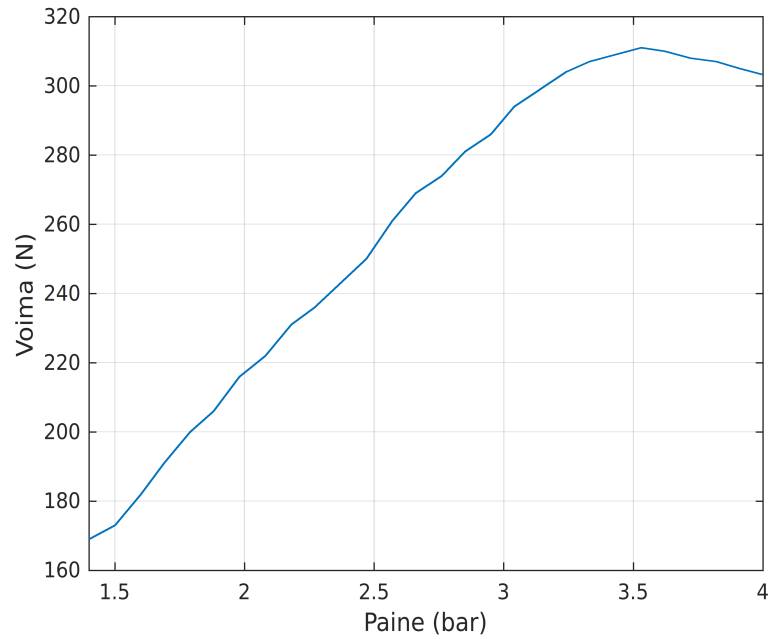
Tiivisteiden vapaavirtaus syöttöpaineen funktiona on esitetty kuvassa 6.3. Mittaus suoritettiin siten, että tiivistettä ei painettu vastinpintaan, vaan ilman annettiin virrata täysin vapaasti laseroitujen ilmakuristusten läpi. Paineilmaletkut oli mitoitettu siten, että kyseisillä virtaus-
tasoilla merkittävää painehäviötä ei tulisi muualla kuin itse kuristuksissa.



Kuva 6.3: Tiivisteiden vapaavirtaus syöttöpaineen funktiona.

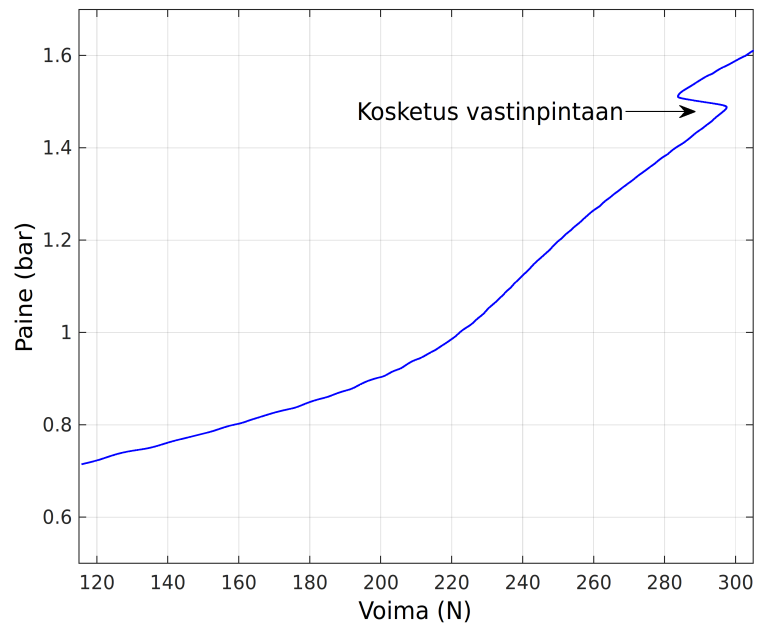
Tiivisteiden kuormankantokyky tiivisteiden syöttöpaineilla 1,4...4,0 bar on esitetty kuvassa 6.4. Vastinpintaa ajettiin pyörimisnopeudella $90 \text{ }^1/\text{min}$. Laakeri oli asemoitu vastinpinnan keskelle. Kuormaletkun paineeksi oli asetettu vakio 0,7 bar. Kammiopaine oli 0 bar ja kammion huuhotus ulkoilmaan oli auki.

Kitkan minimoimiseksi pallonivel rasvattiin grafiittirasvalla. Suurin voima, jolla tiiviste tietyllä painetasolla toimi ilmalaakerina haettiin lisäämällä tiivisteiden kuormaa kunnes tiivisteiden ilmakalvo petti. Tämän huomasi siitä, että laakeri lähti pyörimään ja reaktiotuesta kuului vaimea kolahdus. Ilmakalvo ei kuitenkaan pettänyt kokonaan, sillä tiivisteelle jäi virtausta kontaktin aikanaikin. Suurin voima, jolla tiiviste toimi ilmalaakerina oli noin 310 N tiivisteiden syöttöpaineen ollessa noin 3,5 bar.

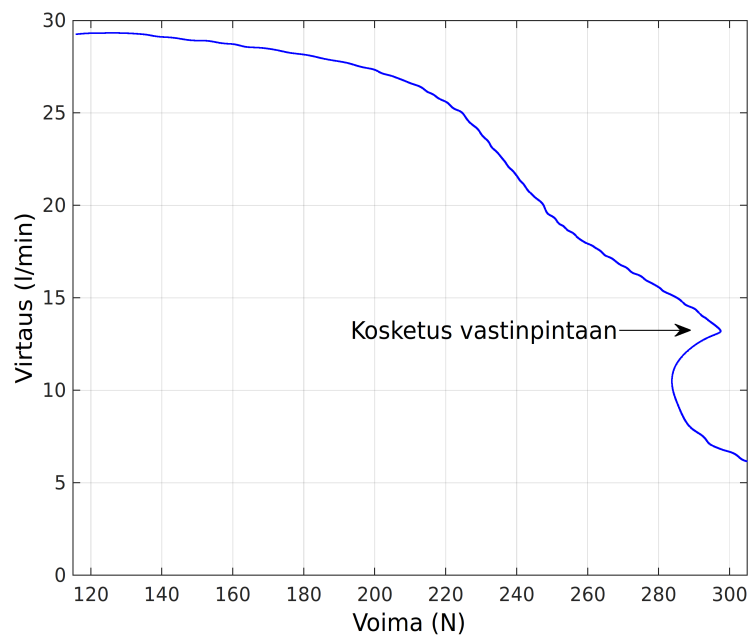


Kuva 6.4: Tiivisteiden ilmalaakeritoiminnan voiman raja-arvo paineen funktiona.

Tiivisteiden toiminta ilmalaakerina tiivisteiden syöttöpaineen vakioarvolla 3,5 bar on esitetty kuvissa 6.5 ja 6.6. Ilmakalvon pettäminen ja tiivistepinnan kosketus vastinpintaan on merkitty kuvaajiin. Laakerin kammiopaineen arvona pidettiin vielä näitä mittauksia tehdessä 0 bar. Tiivisteiden kuormaa ei voitu mitata alkaen voiman arvosta 0 N, koska tiivisteiden toiminta ilmalaakerina vaatii pienen aloituskuorman johtuen testipenkin vaakasuorasta voimalinjasta ja laakerin oman massan aiheuttamasta momentista pallonivelen yli. Mittaus suoritettiin koskematta sorvin pieneen kelkkaan mittausten aikana. Voiman säätö tapahtui muuttamalla kuormaletkun painetta välillä 0,7...1,6 bar.



Kuva 6.5: Tiivisteiden kuorman ja kuormaletkun paineen suhde tiivisteiden syöttöpaineella 3,5 bar.



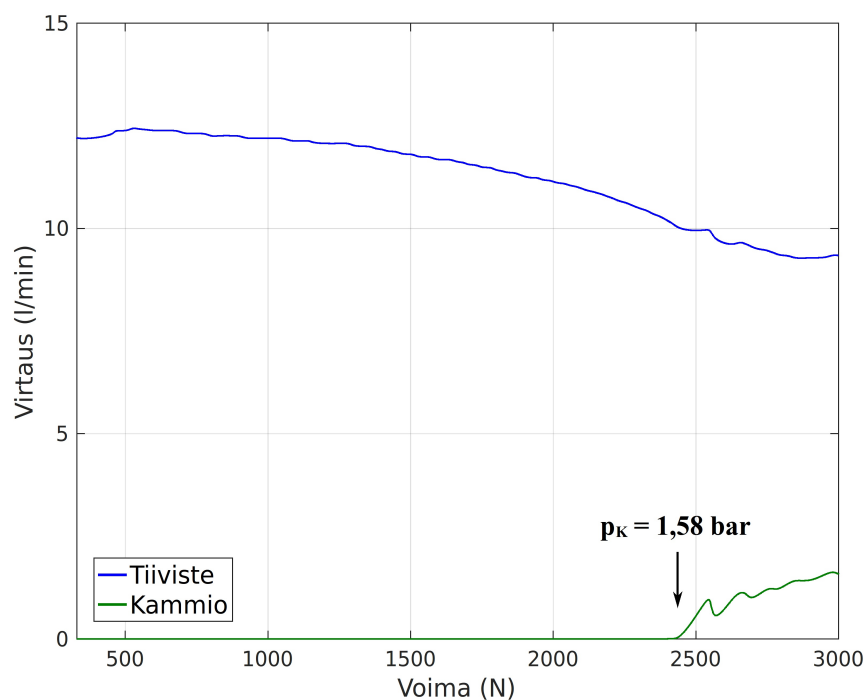
Kuva 6.6: Tiivisteiden toiminta ilmalaakerina tiivisteiden syöttöpaineella 3,5 bar.

6.3 Koelaakerin kokonaistoiminta

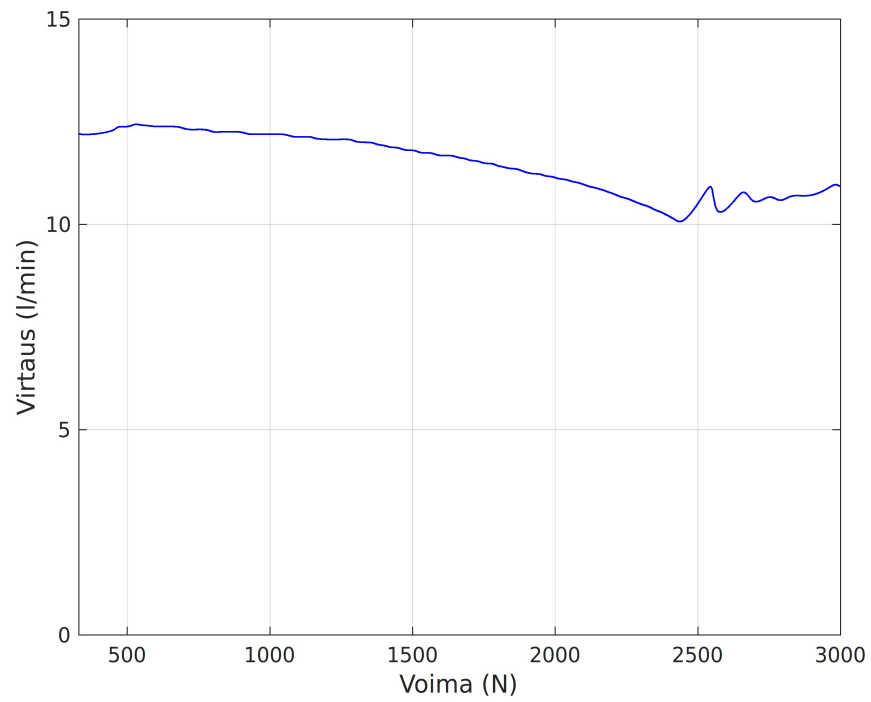
Koko laakerin toimintaa päätettiin testata tiivisteiden vakiolla syöttöpaineella 3,5 bar, jolla tiivisteiden kuormankantokyky oli parhaimmillaan. Tällä paineella myös sen toiminta aero-staattisena tiivisteinä olisi hyvä. Tiivisteiden kantokyvyn maksimi, noin 310 N, määritteli laakerin testauksessa käytetyn alhaisimman kuorman. Voima-anturi olisi mahdollistanut kuorman mittauksen 5 kN asti, mutta testilaakerin toimintaa päätettiin mitata 3 kN asti. Näin ollen voimamittaukset suoritettiin alueella 300...3000 N, joka vastasi laakerin kammiopaineita välillä 0...1,92 bar.

Mittauksia suoritettaessa laakerin vastinpintaa pyöritettiin sorviin asetetulla pyörimisnopeudella 90 1/min. Ensin mittauksia suoritettiin vastinpinnan ollessa suorassa. Suorassa olemisen tarkoitti tässä tapauksessa täsmällisesti vastinpinnan melko pientä 20 µm heittoa mitattuna 185 mm päästä keskilinjalta. Tämä heitto vastasi 0,003 asteen kallistumaa. Mittaustulos laakerin ollessa vastinpinnan keskilinjalla on esitetty kuvassa 6.7. Tiivisteiden ja kammion yhteenlaskettu ilmankulutus on esitetty kuvassa 6.8, ja näiden perusteella laskettu paineilmateho on esitetty kuvassa 6.9. Paineilmateho on laskettu kaavalla 6.1.

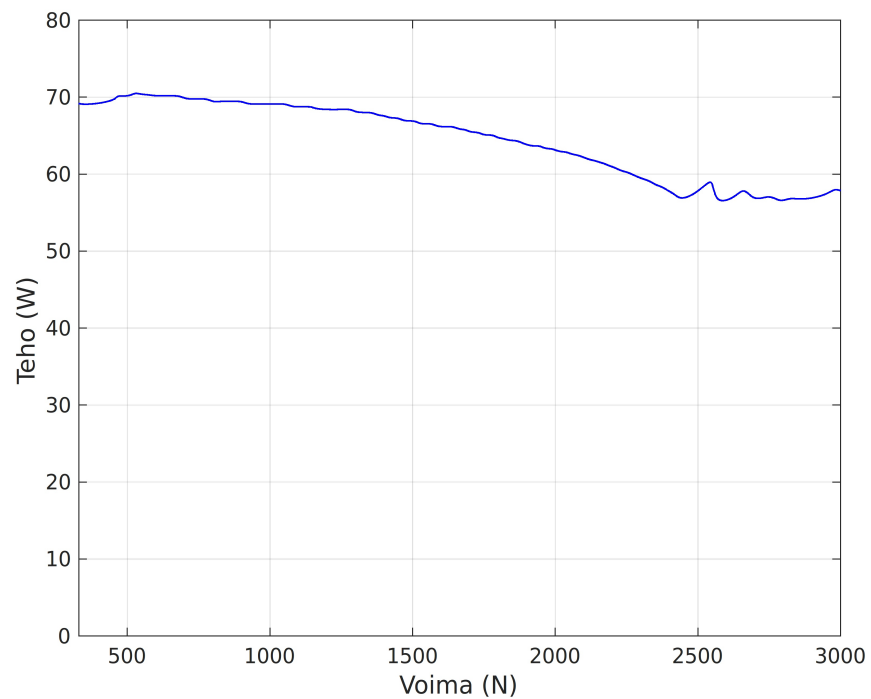
$$P = p_T Q_T + p_K Q_K \quad (6.1)$$



Kuva 6.7: Laakerin tiivisteiden ja kammion ilmankulutukset kuorman funktiona (vastinpinta suorassa ja laakeri vastinpinnan keskellä). Voima välillä $F = 300...3000$ N vastaa kammio-painetta välillä $p_K = 0...1,92$ bar.

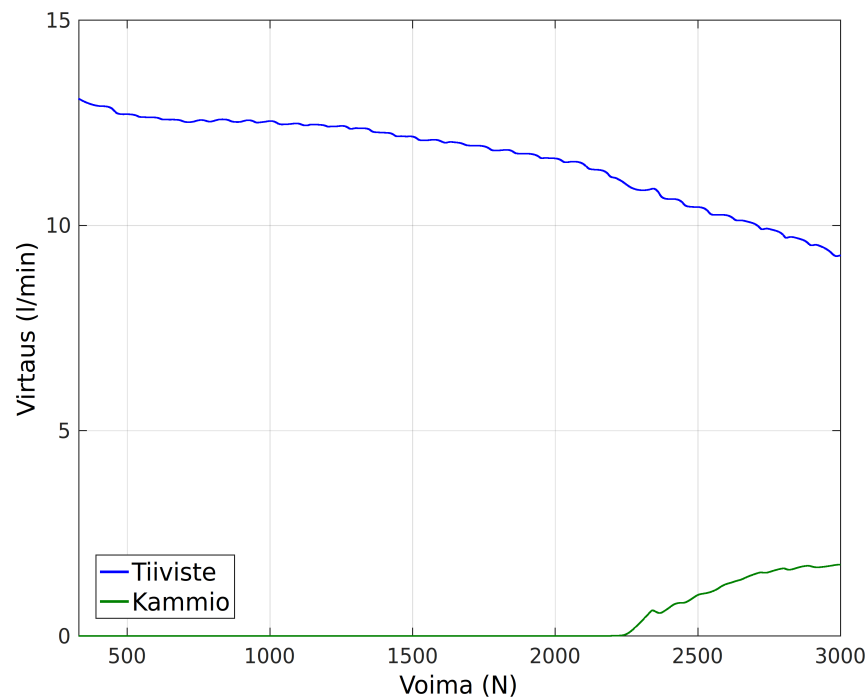


Kuva 6.8: Laakerin kokonaisilmankulutus voiman funktiona (vastinpinta suorassa ja laakeri vastinpinnan keskellä).



Kuva 6.9: Laakerin paineilmatehoon perustuva energiankulutus voiman funktiona (vastinpinta suorassa ja laakeri vastinpinnan keskellä).

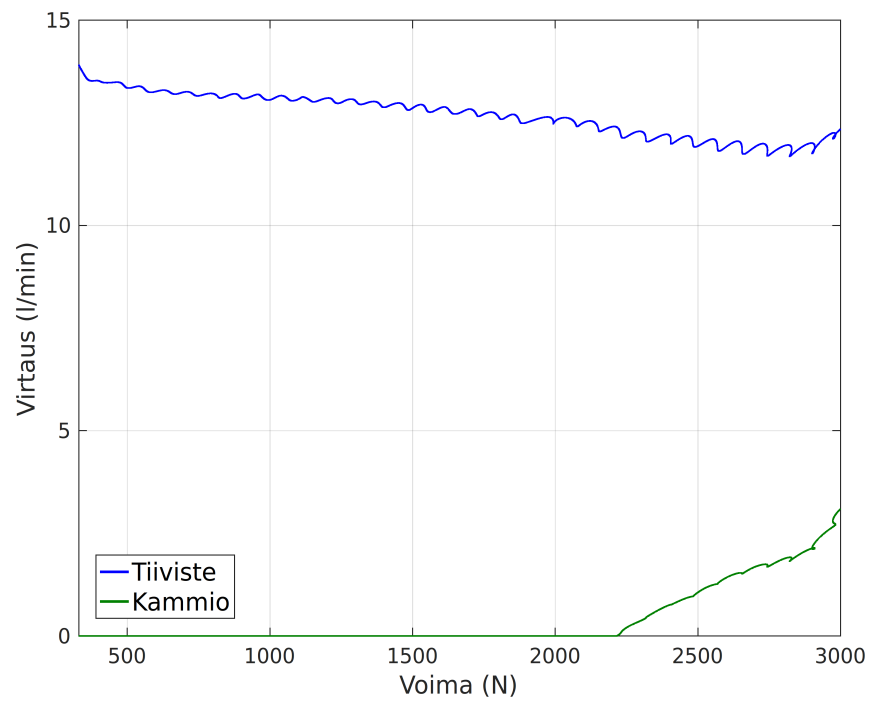
Kuvassa 6.10 on esitetty mittaustulos, kun vastinpinnan kallistuma on edelleen suunnilleen 0 astetta ja laakeria ajetaan 100 mm etäisyydellä vastinpinnan keskilinjalta.



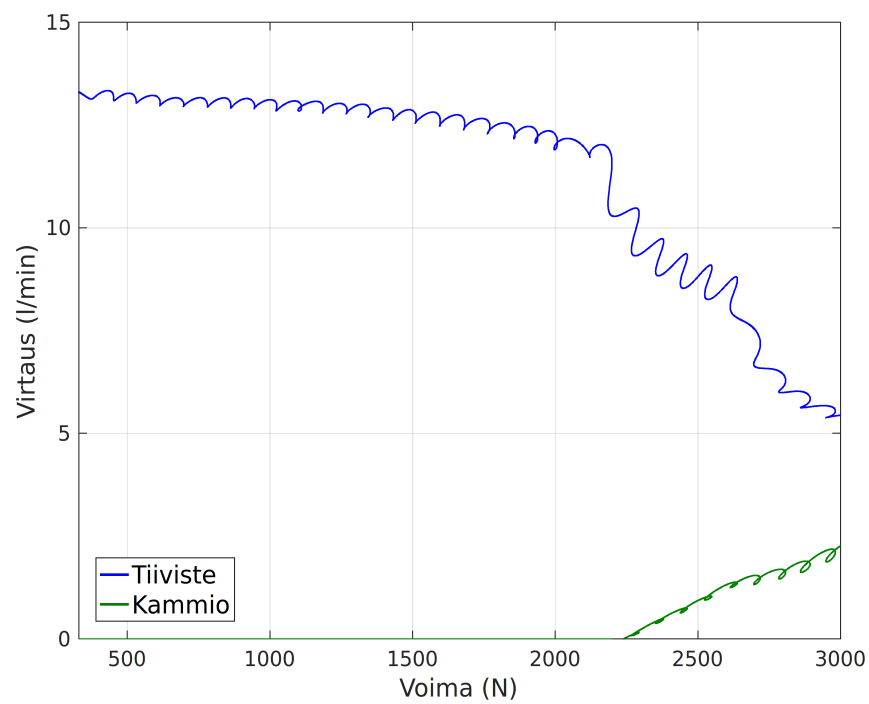
Kuva 6.10: Laakerin ilmankulutukset voiman funktiona (vastinpinta suorassa ja laakeri 100 mm etäisyydellä vastinpinnan keskilinjalta).

Seuraavaksi vastinpinta asetettiin vinoon siten, että 185 mm etäisyydellä keskilinjasta mitattuna heittoa oli 0,4 mm. Tämä vastasi 0,06 asteen kallistumaa vastinpinnassa. Sorvin pyörimisnopeus pidettiin edelleen vaihteen asetuksessa $90 \text{ }^{\circ}/\text{min}$. Kun laakeria ajettiin vastinpinnan keskellä, saatu mittaustulos on esitetty kuvassa 6.11. Kun laakeria ajettiin siten, että laakerin keskilinja poikkeaa 100 mm vastinpinnan keskilinjasta, saatu mittaustulos on esitetty kuvassa 6.12.

Kuvissa 6.11 ja 6.12 käyrät näyttävät siltä ikään kuin ne olisi piirretty useamman kuin yhden muuttujan suhteen. Tässä ei kuitenkaan ole virhettä. Käyrän sykkiminen johtuu siitä, että mittausta suoritettaessa kammiopainetta on kasvatettu ajan funktiona. Tämä yhdessä vastinpinnan pyörimisen ja vinon asemoinnin kanssa on aikaansaanut ilmankulutuksen ja voiman heilahtelun.

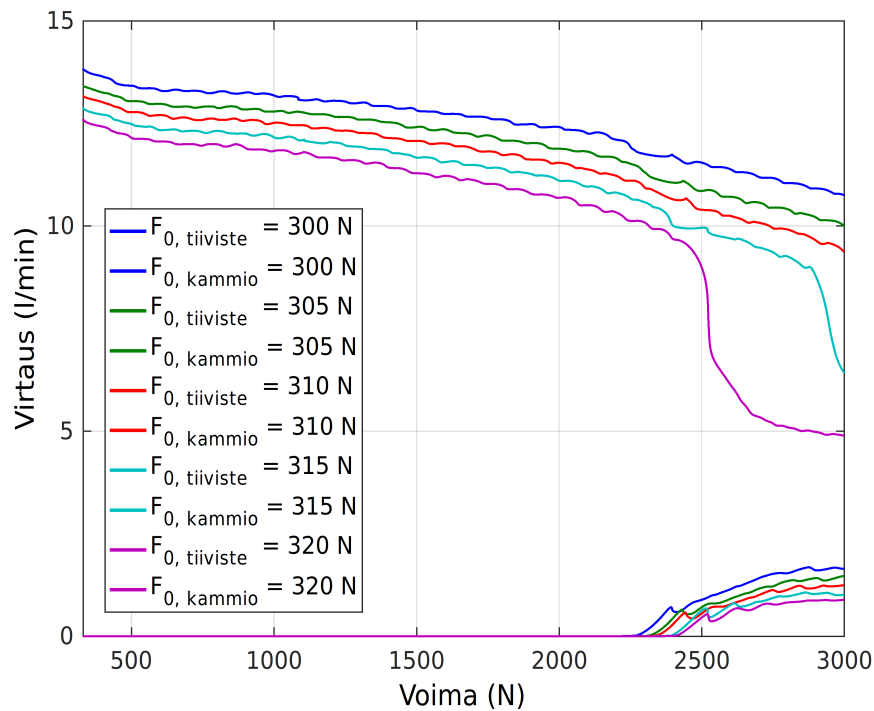


Kuva 6.11: Laakerin ilmankulutukset vastinpinnan keskilinjalla ja kallistettuna 0,06°.



Kuva 6.12: Laakerin ilmankulutukset 100 mm vastinpinnan keskilinjalta ja kallistettuna 0,06°.

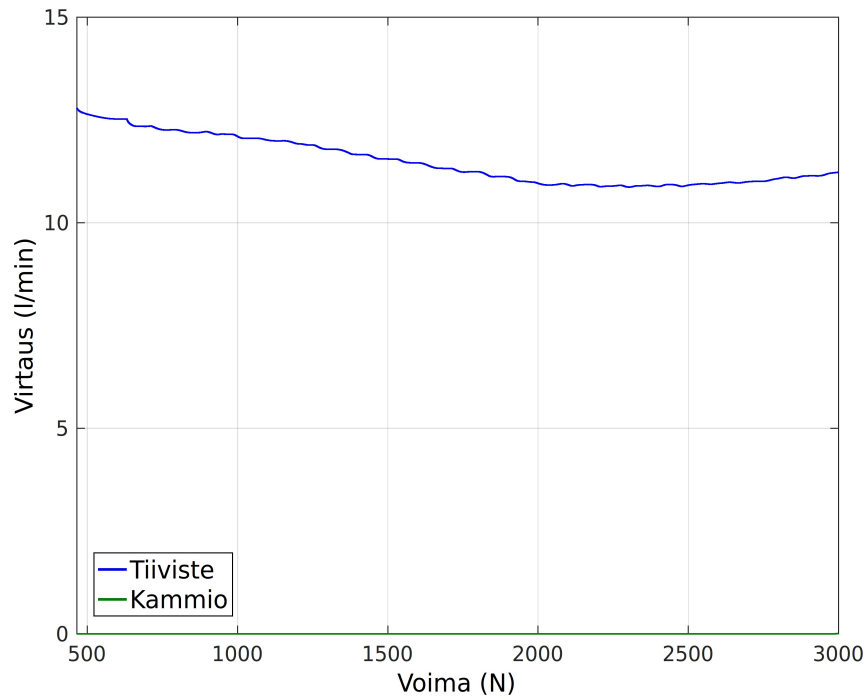
Kuvassa 6.13 on havainnollistettu sitä, miten tiivisteen aloituskuorma vaikuttaa tiivisteiden kantokyvyn romahtamiseen suuremmilla kammionpaineilla. Kun aloituskuorma lähenee arvoa 320 N, tiivisteiden ilmankalvo pötkähtää laakerin kuorman ollessa noin 2500 N. Kantokyvyn romahtaminen huomattiin siitä, että laakeri pyöri reaktiotukea vasten samalla, kun tiivisteiden ilmankulutus äkillisesti laski. Mittauksen aikana vastinpinta oli suorassa ja laakeri 100 mm etäisyydellä vastinpinnan keskijonjalta.



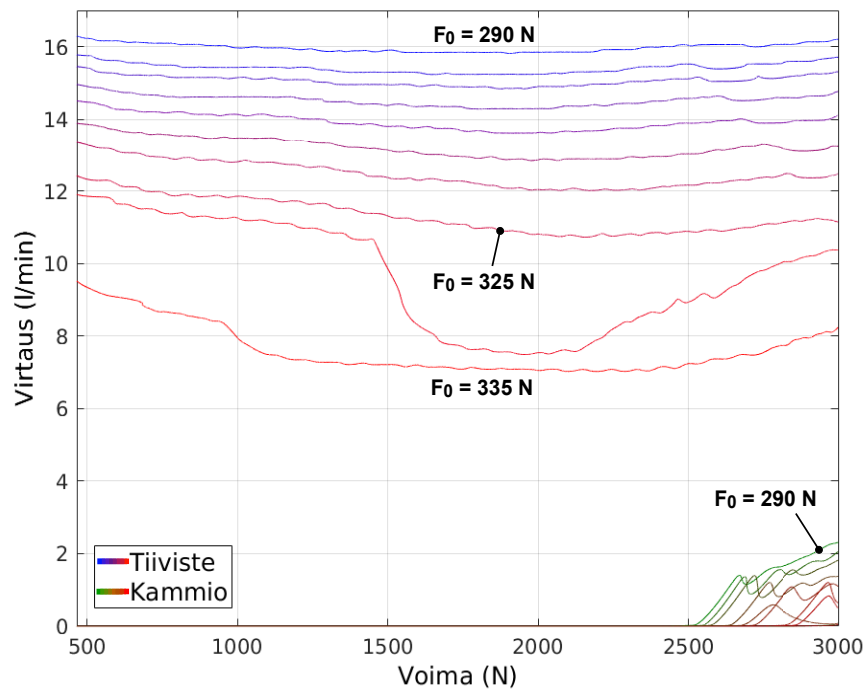
Kuva 6.13: Laakerin ilmankulutukset tiivisteiden eri aloituskuormilla (vastinpinta suorassa ja laakeri 100 mm etäisyydellä vastinpinnan keskijonjalta).

Mittausmallia päätettiin hienosäätää kuormitusletkun kompensoinnin osalta (Kaava 5.1), jotta tiivisteiden kantokyky ei romahtaisi niin äkillisesti silloin, kun haetaan pienintä mahdollista laakerin ilmankulutusta. Saatu, tähänastisista mittaustuloksista paras, jossa kammion ilmankulutus saatiin tiputettua nolleen, on esitetty kuvassa 6.14. Vastinpinta oli mittauksen aikana asemoitu suoraan ja laakeria ajettiin vastinpinnan keskijonjalta.

Tiivisteiden kantokyvyn romahtamista tällä hienosäädetyllä mittausmallilla on havainnollistettu kuvassa 6.15. Siinä sinisestä-punaiseen-käyrät edustavat tiivisteiden ilmankulutusta ja vihreästä-punaiseen-käyrät kammion ilmankulutusta, kun tiivisteiden aloituskuormaa on muutettu välillä $F_0 = 290 \dots 335$ N kuorma-askeleena 5 N. Tiivisteiden ilmankulutus suurimmalla alkukuormalla $F_0 = 325$ N ennen kantokyvyn romahtamista on merkitty kuvaan. Kammion virtaus on tässä vaiheessa nollassa kammion painealueella $p_K = 0 \dots 1,92$ bar.



Kuva 6.14: Laakerin ilmentkulutus hienosäädetyllä kuormaletkun kompensoinnilla (vastinpinta suorassa ja laakeri vastinpinnan keskilinjalla). Kammiovirtaus on nollassa.



Kuva 6.15: Laakerin ilmentkulutukset hienosäädetyllä mittausmallilla tiivisteiden eri alkukuormilla, $F_0 = 290 \dots 335$ N (vastinpinta suorassa, laakeri vastinpinnan keskilinjalla). Tiivisteiden kantokyvyn romahdus tapahtuu, kun tiivisteiden aloituskuorma on suurempi kuin 325 N.

6.4 Askelvastemittaukset

Askelvasteiden mittausta varten mittaussmalliin lisättiin PID-säädin. Mallissa voima-anturilta liitettiin negatiivinen takaisinkytkentä kammio-paineen säätimeen. Näin mittausjärjestelmän laakeria voitiin käyttää voimatoimilaitteena. PID-säätimen parametrit viritettiin kokeilemalla manuaalisesti erilaisia arvoja, kunnes säädin vaikutti stabiililta eikä asetetun ja mitatun voiman vastaavuuteen jäänyt virhettä.

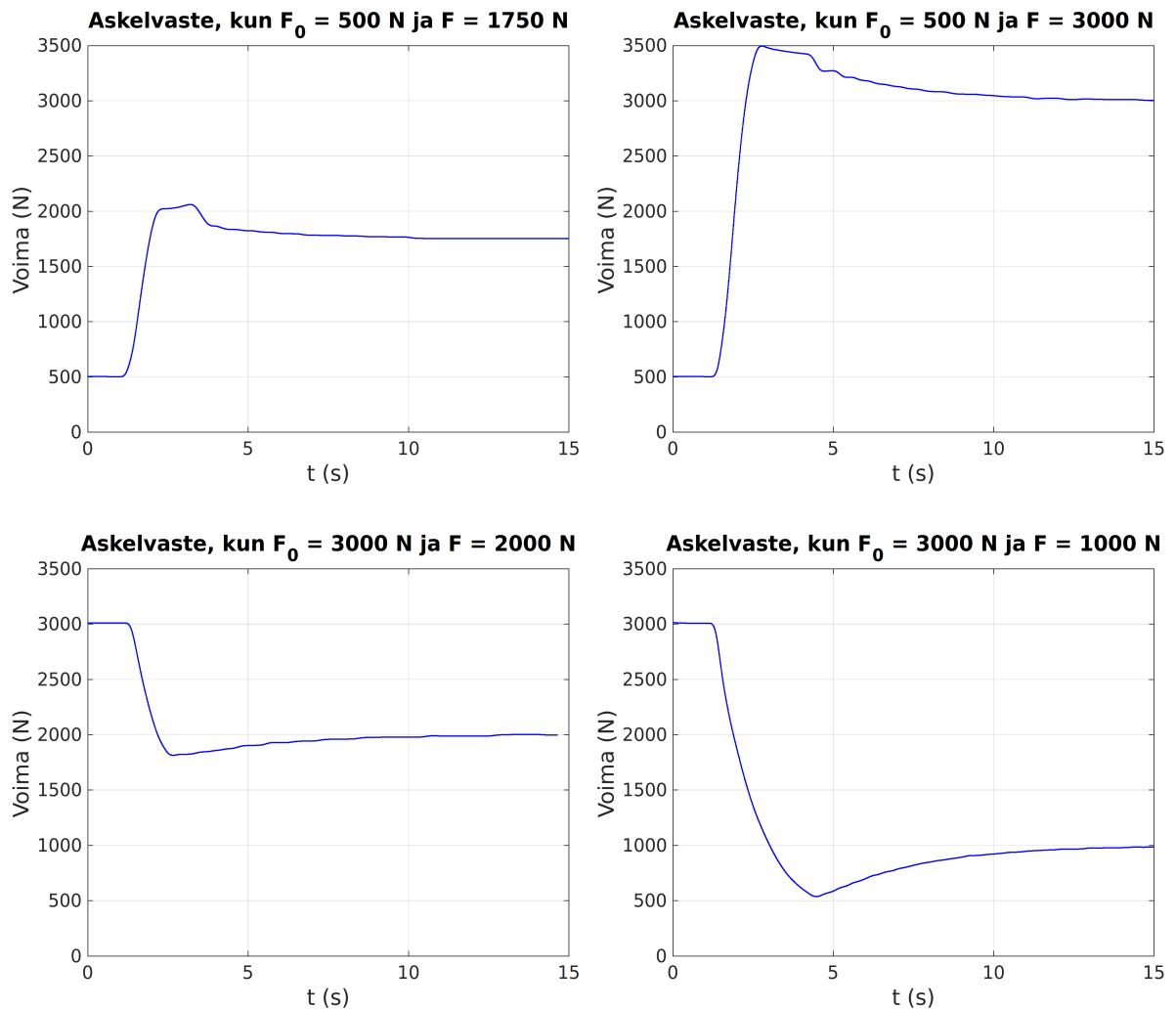
Mittausmallin luonteesta johtuen säätimen parametreja ei voitu hakea käyttämällä apuna Simulink-ohjelman automaattista PID-säätimen viritystoimintoa. PID-säätimen kertoimiksi saatiin kokeellisesti taulukossa 6.1 esitetyt arvot.

Taulukko 6.1: PID-säätimen kertoimet ja suodattimen näytetiheys.

Termi	P	I	D	N
	0,6	0,2	0,07	100

Askelvasteet mitattiin siten, että voima-anturin ulostulon annettiin ensin tasoittua haluttuun aloitusarvoon, jonka jälkeen mittausta käynnistettiin. Halutun askeleen ohjaus kytkettiin ajanhetkellä $t = 1$ s, jonka jälkeen odotettiin kunnes voima-anturin ulostulo on jälleen tasoittunut. Askelvastemittausten tulokset on esitetty kuvassa 6.16. Askelfunktioiden mitauksista johdetut nousu-, lasku- ja asettumisajat on esitetty taulukossa 6.2.

Kammiovirtausta ei ollut järkevää mitata askelvastekokeiden yhteydessä, koska kammio-paineen nopea muutos nosti kammiovirtauksen mitta-alueen ulkopuolelle. Myöskään tiivistevirtausta ei näissä kokeissa mitattu, sillä alustavissa askelvastekokeissa tiivisteen toiminta oli hyvin puutteellista. Tiivistekuorma päätettiin nostaa ilmalaakeritoiminnan ylittävälle tasolle, jotta vuotovirtaukset eivät olisi vaikuttaneet askelvasteisiin. Näin ollen myöskään tiivistevirtauksen mittauksen askelvastemittausten yhteydessä ei katsottu tuovan kiinnostavaa tietoa laakerin toiminnasta.



Kuva 6.16: Mitatut askelvasteet ilmalaakerin ollessa voimatoimilaitteena. Tavoiteltu ulostulo ja ohjaus on kytketty ajanhetkellä $t = 1$ s.

Taulukko 6.2: Voimatoimilaitteen askelvasteista johdettuja nousu- ja asettumisaikoja.

Askelfunktio [N]	Nousuaika [s]	Asettumisaika (2 %) [s]
500...1750	0,53	4,4
500...3000	0,72	7,4
3000...2000	0,65	6,3
3000...1000	0,97	9,2

Luku 7

Tulosten pohdinta

Tässä luvussa analysoidaan koelaakerin mittaustuloksia erikseen kuormitusletkun, tiivisteen ja koko laakerin toiminnan kannalta. Saatujen numeroarvojen valossa pohditaan kohteessa käytetyn tasomaisen tiivistekonseptin toimivuutta. Mitattujen ilmankulutusten pohjalta arvioidaan hypoteettisen paineilmakäyttöisen taipumakompensointijärjestelmän energiatehokkuutta.

7.1 Kuormitusletkun toiminta

Kuormaletkun paineen jokseenkin epälineaarista vaikutusta letkun tuottamaan tiivistekuormaan ei osattu odottaa. Kuvan 6.1 perusteella laskettu käyräänsovitus on esitetty kaavassa 7.1, jossa voima määräytyy paineen potenssifunktiona. Letkun jäykkyys kasvaa paineen noustessa potenssifunktion mukaan. Letkun ominaisuuksilla voitaisiin luonnollisesti vaikuttaa jäykkyyteen, sillä paine kasvattaa letkun seinämän jännitystä. Oman lisänsä tuo letkun ja tiivisteen rungon kitkasta aiheutuva voima, jolla saattaa olla osuutensa epälineaariseen käyttäytymiseen.

$$F(p) = 170 p^{1,44} \quad (7.1)$$

Vakiopaineella letku alkaa toimia lineaarisena jousena, kun painetta letkussa on vähintään 0,75 bar. Tällä painetasolla jousivakion arvoksi saatiin kuvan 6.2 käyrän perusteella lasketua $k = 455 \text{ N/mm}$. Kuormaletku ja tiivisteen ilmakalvo muodostavat jousisysteemin, jossa jouset ovat sarjassa. Koska tiivisteen ilmalaakeripinnan ilmakalvon paksuutta ei tällä laakerikonstruktiolla ollut mahdollista mitata, tiivisteen dynaamisia ominaisuuksia ei voitu analysoida fysikaalisesti.

Jousisysteemin jäykkyys määräytyy sarjaan kytkettyjen jousien tapauksessa lähinnä alhaisimman jäykkyyden omaavan jousen mukaan. Peräkkäin kytkettyjen jousien yhteinen jousivakio, k_{ekv} lasketaan kaavan 7.2 mukaan.

$$k_{\text{ekv}} = \left(\sum_{i=1}^n k_i^{-1} \right)^{-1} \quad (7.2)$$

Jos tehdään sellainen realistinen oletus, että tiivistepinnan ilmakalvon jäykkyys on huomattavasti suurempi kuin kuormaletkun jäykkyys, tästä seuraa se, että koko kuormaletku-tiiviste -yhdistelmän käyttäytymistä voidaan approksimoida mitatulla letkun jäykkyydellä $k = 455 \text{ N/m}$ (painetasolla $p_L = 0,75 \text{ bar}$). Tiivisteen epästabiili käyttäytyminen osassa mittauksia ei kuitenkaan perustune tähän verraten alhaiseen jäykkyyteen, vaan pikemmin-

kin siihen havaittuun ilmiöön, että jäykkyys muuttuu kuormapaineen funktiona.

Kuormaletkuna voisi toimia silikoniletkua paremmin kudoksellinen litteä letku, jonka ilmatila olisi niin suuri kuin konstruktion puolesta on mahdollista. Tämä kasvattaisi paine-voima -lineaarisuutta, mutta silti vähentäisi kuormaletkun jäykkyyttä ja letkun puristuman vaikutusta tiivistekuormaan.

Taipumakompensoidussa telassa letkun suuri jousivakio tuskin olisi ongelma, sillä taipuman vaikutus 180° kulmaan asetettujen aksiaalitiivisteiden vastinpinnan normaalin suuntaiseen kuormaan olisi marginaalinen. Kuitenkin tasomaisen tiivistekonseptin tulokset antavat osviittaa hypoteesille, jonka mukaan tiivisteiden ilmalaakeripinnan kannattaisi olla mahdollisimman jäykkä, kun taas tiivisteiden kuormansäätömekanismin puolestaan pitäisi olla jousivakioiltaan mahdollisimman alhainen.

7.2 Aerostaattisen tiivisteiden ominaisuudet

Kuvassa 6.3 esitetyn tiivisteiden vapaavirtauksen perusteella voidaan arvioida ilmakuristuksissa syntyvää painehäviötä tietyllä virtaustasolla. Paineilmajärjestelmän tuotto riitti luotettavasti siihen, että esimerkiksi ilmankulutuksen arvolla 35 l/min tiivisteiden syöttöpaineeksi asetettu 3,5 bar oli sitä myös tiivisteiden sisältä mitattuna. Tällä perusteella varsinaisia tiivisteiden ilmankulutustmittauksia suoritettaessa voitiin olettaa, että eroa asetetun ja mitatun paineen välillä ei ollut. Tämän mittaukset vahvistivat.

Ilmasuuttimien muotoa arvioitiin epäsuorasti Beaterin kaavalla (4.8). Tiivisteiden syöttöpaineen arvolla $p_T = 3,5$ bar ilmakuristusten vapaavirtaus oli yhteensä 35 l/min. Yksittäistä ilmasuutinta kohti se vastasi ilmavirtausta 0,97 l/min. Virtausmittarien sisäinen paineen alenema ja ilman lämpötilan muutos oletettiin häviävän pieniksi. Tällä perusteella yksittäisen suuttimen massavirran tasona laskelmissa käytettiin arvoa 0,0867 g/s.

Virtausfunktion (4.13) arvolla $\psi = 0,484$, adiabaattivakiolla 1,4, ilmasuuttimen painesuhteella $K = 0,224$, purkauskertoimen arvolla $C_d = 0,828$, lämpötilan arvolla $T = 293,15$ K ja suuttimen absoluuttisen tulopaineen $p_1 = 4,513$ bar perusteella saatiin Beaterin kaavasta (4.8) johdettua (7.3) yksittäisen ilmasuuttimen poikkipinta-alan arvoksi $A = 9,83 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$.

$$A = \frac{\dot{m}}{C_d \psi p_1 \sqrt{\frac{2}{RT}}} \quad (7.3)$$

Arvioidun poikkipinta-alan perusteella reikien keskimääräinen halkaisija, $d = \text{Ø}354 \text{ }\mu\text{m}$. Ero mikroskooppikuvista mitattuun halkaisijan keskiarvoon $\text{Ø}152 \text{ }\mu\text{m}$ on ennakoitua paljon suurempi. Jos purkauskertoimeksi oletettaisiin $C_d = 0,98$, reikien arvioiduksi halkaisijaksi saataisiin $\text{Ø}325 \text{ }\mu\text{m}$. Sekin poikkeaisi mitatusta keskiarvosta niin paljon, ettei purkauskertoimen hienosäätäminen riittäisi selittämään eroa.

Tiivisteen ilmalaakeripinnan tasoitushionta laserporauksen ja mikroskooppikuvien taltioinnin jälkeen selittää ainakin osan tästä virheestä. Ilmareiät ovat kartiomaisia siten, että reiän halkaisijan minimi on lasersäteen sisäänmenon ja samalla ilmalaakeripinnan puolella. Lisäksi mikroskooppikuvissa on nähtävissä ilmalaakeripinnan tuntumassa rei'issä ohut ja terävä kaula, jonka vähäinenkin hionta on mahdollisesti repinyt pois. Toinen virhetta selittävä tekijä voisi olla se, jos Beaterin kaava ei jostakin toistaiseksi tunnistamattomasta syystä olisikaan pätevä koelaakerin ilmakuristusten mallintamiseen.

Tiivisteen suurimman kuormankantokyvyn kartoitus tuotti yllätyksen. Oletus siitä, että tiivisteen syöttöpaineen kasvatus nostaisi myös sen kuormankantokykyä, olikin väärä. Saavuttaessa lähelle tiivisteen syöttöpainetta $p_T = 3,5$ bar paineen lisääminen alkoikin yllättäen laskea kuormankantokykyä. Syyksi tähän arveltiin tiivistepinnan muuttumista kaarevaksi paineen noustessa ja samalla ilmakalvon pinta-alan laskua, jolloin kalvon paine ei enää riittänytään estämään kontaktia vastinpinnan kanssa.

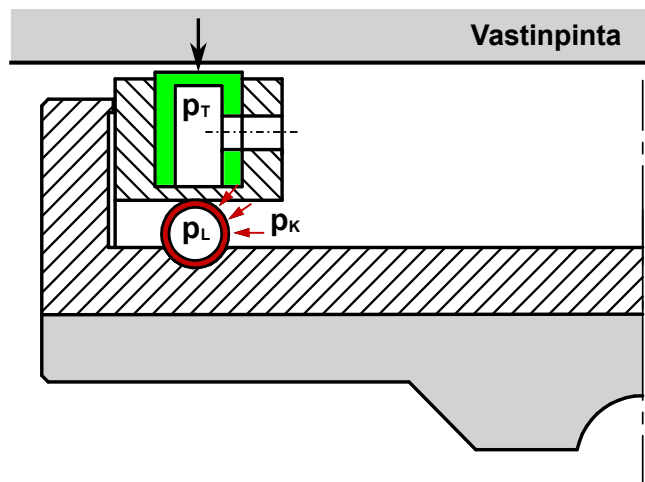
Paine $p_T = 3,5$ bar oli kuitenkin merkittävästi suurempi kuin mittauksissa käytetty suurin kammioaine $p_K = 1,92$ bar, joten tiivistepaineen toiminnallinen yläraja ei aiheuttanut ongelmia koko laakerin toimintaa mitattaessa. Tiivistettä ei myöskään oltu suunniteltu yli 4 bar syöttöpaineille, sillä 4 bar paine vastaisi pidätinruuveissa ja tiivisteen porauksissa yhteensä jo noin 2000 N leikkausvoimaa. Yhtä pidätinruuvia ja porausta kohti se vastaisi noin 170 N leikkausvoimaa. Ajotilanteessa kuormitus laakerin vastinpintaan tosin vähentää näitä leikkausvoimia.

Edellinen mittaus suoritettiin säätämällä tiivisteen voimaa sorvin kelkan käsiruuvia pyörittämällä kuormaletkun paineen ollessa vakiona. Seuraava mittaus suoritettiin päinvastoin, käsiruuvien ollessa paikallaan ja säätämällä tiivisteen kuormaa kuormitusletkun painetta muuttamalla. Tiivisteen syöttöpaine pidettiin vakiona $p_T = 3,5$ bar. Tässä mittauksessa kantokyvyn suurimmaksi arvoksi jäi noin 295 N voima tiivisteen ilmankulutuksen ollessa tällöin $Q_T = 13,2$ l/min (Kuva 6.6).

Tiivisteen syöttöpaineen ollessa 3,5 bar – toisin kuin kuormaletkun toimintaa arvioitaessa (Kuva 6.1), jossa se oli 0 bar – kuvaajan 6.5 käyttäytyminen poikkeaa oleellisesti kuvaajasta 6.1. Tässä on syytä huomata, että voiman ja paineen akselit vaihtavat paikkaa. Tästä huolimatta kuvaajan perusteella käytös on täysin erilaista. Syynä tähän on oletettavasti tiivistepinnan ilmakalvon vaikutus voimaan. Kuvaaja 6.6 antaa vahvistusta tälle oletukselle. Siinä voiman kasvattaminen vähentää tiivisteen ilmankulutusta. Voiman kasvaessa ilmaraako pienenee, tiivisteen ilmankulutus vähenee, ja tiivistepinnan paine kasvaa. Paineen kasvattaminen nostaa ilmakalvon jäykkyyden aiheuttaman voiman osuutta koko voimasta.

7.3 Koelaakerin toiminnan kokonaisarviointi

Jo ensimmäisissä mittauksissa käytetyssä Simulink-mallissa on kuormaletkun paineelle kompensointi, jonka suuruus on 50 % kammiopaineesta. Jos kuormaletku olisi kahden tasaisen levyn välissä, kammiopaine kasvattaisi letkun tuottamaa kuormaa silloinkin, kun letkun sisäinen paine pysyisi vakiona. Mutta koska kuormaletku on laakerikammioon jyrstyssä urassa, kammiopaine p_K aiheuttaakin sen, että kuormaletkun tuottama voima alenee kammiopaineen noustessa (Kuva 7.1).



Kuva 7.1: Kammiopaineen lisäys laskee kuormitusletkun tuottamaa tiivistepinnan normaalin suuntaista voimaa. Lisäksi se muuttaa tiivistepinnan painejakaumaa, jos tiivisteiden syöttöpaine pidetään vakiona.

Kompensoinnilla siis kasvatetaan kuormaletkun painetta. Tämä on tarpeellista myös siksi, että kammiopaineen noustessa tiivistepinnan painejakaumakin muuttuu, josta aiheutuu ylimääräistä kuormaa. Tämäkin kuorma on kompensoitava, jotta ilmarako säilyy riittävän matalana vuotojen minimoimiseksi. Kompensointi havaittiin siitäkin syystä tarpeelliseksi, että ensimmäisten mittausten lomassa (Kuva 6.7) kammioista mitattiin vuotoa kammiopaineen ollessa alkaen noin 1,6 bar ja voiman ollessa alkaen noin 2500 N.

Koska tiivisteiden syöttöpaine pidettiin vakiona 3,5 bar, vuoto tuskin tapahtui tiivistepinnan kautta. Tämä on pääteltävissä siitä, että tiivisteiden ilmavirtaus tuolla hetkellä oli noin 11 l/min. Kuvan 6.3 perusteella se vastaa noin 0,6 bar painehäviötä tiivistepinnan ilmakuristuksissa. Tiivistepinnan painehuippu on siis tuolla hetkellä ollut noin 2,9 bar eli oleellisesti suurempi kuin kammiopaine. Kammiovuoto ei siis ole voinut tapahtua tiivistepinnan kautta, koska näillä painetasoilla vuoto tapahtuu tiivisteeltä kammioon eikä toisin päin. Täsmällistä vuotokohtaa ei kyetty paikantamaan. Mahdollisesti se oli kuormitusletkun sisäänmenon ja laakerirungon välissä. Kammiovuoto saatiin parametreja hienosäätämällä lähes minimoitua, ja parannetulla mittausmallilla se saatiin jo nollassa.

Kuvan 6.7 mukaan tiivisteen vuotovirtaus pienenee, kun kokonaisvoima kasvaa. Tämä aiheutuu letkun kompensoinnista ja sitä seuraavasta ilmakalvon ohenemisesta. Ilmankulutuksen tasot ovat verraten maltillisia, kun laakeria ajetaan vastinpinnan keskellä pinnan ollessa suorassa. Kuvia 6.7, 6.8 ja 6.9 vertailemalla käy ilmi, että tiivistevuoto merkitsee laakerin energiankulutuksen kannalta enemmän kuin kammiovuoto, koska tiivisteen syöttöpaine oli kammiopainetta merkittävästi suurempi.

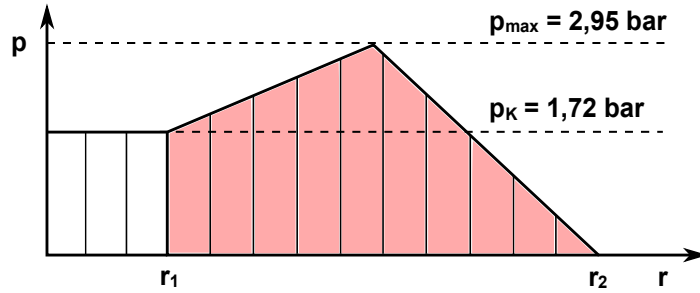
Laakerin asettaminen 100 mm etäisyydelle vastinpinnan keskilinjalta ei muuttanut ilmankulutuksia merkittävästi (Kuva 6.10). Sen sijaan vastinpinnan asettaminen 0,06 asteen kallistumaan hieman kasvatti virtauksia (Kuva 6.11), kun laakeri oli vastinpinnan keskellä. Mitatussa kulutuksessa on myös heilahtelua.

Kun vastinpinnan kallistuman lisäksi laakeria ajettiin 100 mm etäisyydellä keskilinjalta, tiivisteen kantokyky romahti mitatun voiman ollessa noin 2150 N. Romahtamisen täsmällisestä syystä ei saatu varmuutta. Todennäköistä on, että vastinpinnan pyrkiessä kallistamaan laakeria pallonivelen kitkasta aiheutuu tukivoiman seurauksena momenttia. Tämä aiheuttaa tiivistekuorman epätasaisen jakauman tiivisteen kehän suunnassa, jonka seurauksena tiivisteen ilmakalvo pettää. Tätä mitä todennäköisimmin edesauttaa ilmareikien hetkellinen tukkeutuminen kontaktin seurauksena. Tämä olisi luultavasti estettävissä tiivistepinnan ilmataskuilla. Kuvassa 6.12 ilmankulutuksen äkillinen lasku ei siis ollut seuraus oikeaoppisesta ilmalaakeritoiminnasta, vaan kosketuksesta vastinpintaan.

Tiivisteen kuorma oli erikseen säädettävissä, mutta ei erikseen täsmällisesti mitattavissa silloin, kun kammiossa on painetta. Kuvassa 6.13 esitetyistä tuloksista ei voida suoraan päätellä letkukuormaa tiivisteen kantokyvyn romahtaessa voiman arvolla n. 2500 N. Tiivisteen aloituskuormana siinä oli 320 N, mikä ylittääkin tiivisteen aerostaattiselle toiminnalle aluksi mitatun maksimikuorman 310 N. Tiivisteen kuorma jonkin verran kasvaa, kun kammiopainetta nostetaan.

Painejakauman arviointi

Tiivisteen kuorma ilmakalvon pettämisen hetkellä voidaan arvioida epäsuorasti tiivisteen oletetun painejakauman ja mitatun ilmankulutuksen avulla. Romahtamisen hetkellä kammiopaine, $p_K = 1,72$ bar ja tiivisteen ilmavirtaus, $Q_T = 9,5$ l/min. Tällä virtauksella kuvan 6.3 perusteella arvioituna tiivisteen ilmakuristusten painehäviö on ollut 0,55 bar, joten tiivistepinnan painejakauman huippu, $p_{\max} = 2,95$ bar. Näiden lukujen perusteella arvioituna painejakauma on ollut kuvan 7.2 mukainen.



Kuva 7.2: Tiivistepinnan painejakauman approksimaatio juuri ennen sitä hetkeä, kun ilmakalvo pettää. Tiivisteiden reunojen mitat, $r_1 = 60$ mm ja $r_2 = 73$ mm pitäisivät myös painejakauman rajakohtien osalta paikkansa, ellei tiivistepinta joustaisi tiivisteiden sisäisen paineen vuoksi.

Kuvan 7.2 painejakauman integrointi tiivistepinnan yli antaisi tiivisteiden kuormankantokyvyksi paljon suuremman arvon kuin mitä tiivisteiden maksimikuorma kuvassa 6.4 esitetyn mittaustuloksen perusteella käytännössä on. Tällä perusteella arvioituna kuvan 7.2 painejakauma ei voi olla todenmukainen. Eikä se olekaan, jos tiivistepinta muuttuu tiivisteiden syöttöpaineen seurauksena kaarevaksi. Silloin tiivisteiden efektiivinen r_1 kasvaa ja r_2 pienenee. Muutos on merkittävä, sillä kaavan 4.3 mukaan ilmaraon korkeuden kasvatus laskee paine-eroa voimakkaan epälineaarisesti.

Tiivistekuormaan vaikuttavat kuormaletkun itsensä epälineaarisuudet, kammion paineen vaikutus kuormaletkuun sekä tiivistepinnan painejakauman muutos. Mittausmalliin haettiin kokeellisesti parempi kuormaletkun kompensointi. Uudessa mallissa käytettiin kaavan 5.1 mukaista kompensointia. Paremman mittausmallin avulla etsittiin mahdollisimman alhaiset virtaukset ennen kuin tiivisteiden ilmakalvo pettää. Nyt kammion vuoto saatiin pysymään nollassa laakerin suurimpaan mitattuun kuormaan asti (Kuva 6.14).

Kammiopaineen, p_K , ollessa tiivistepinnan painehuippua, p_{\max} , alhaisempi, tiivisteiden vuotovirtaus tapahtuu ulkoreunan lisäksi myös kammion puolelle. Kaavasta 4.4 saadaan johdettua tiivisteiden ulkoreunan ja kammion puoleisille massavirroille kaavan 7.4 mukainen suhde, jossa r_1 on tiivisteiden kammionpuoleisen reunan säde, r_k on painehuipun säde ja r_2 tiivisteiden ulkoreunan säde.

$$\frac{\dot{m}_u}{\dot{m}_s} = \frac{(p_{\max}^2 - p_0^2) \ln(r_1/r_k)}{(p_K^2 - p_{\max}^2) \ln(r_2/r_k)} \quad (7.4)$$

Kuvan 7.2 esittämässä tilanteessa tiivistevirtauksen tasolla 9,5 l/min, kokonaismassavirran ollessa 0,849 g/s, arvioitiin kaavan 7.4 mukaisesti tiivisteiden ulkoreunan puoleisen virtauksen olleen kammion puoleiseen virtaukseen verrattuna 1,96-kertainen. Tulos vaikuttaa testeihin perustuen oikean suuntaiselta, vaikka tiivisteiden ulkoreunan ja kammion puoleisia virtauksia ei laakerikokeiden aikana mittauksissa järjestelmällisesti eritelty eikä työssä dokumentoitu.

Tiivisteiden ilmaraon arviointi

Ilmaraon paksuutta arvioitiin edelleen Powellin kaavasta (4.4) johdetulla kaavalla (7.5) käyttäen kaavaan 7.4 perustuen tiivisteiden ulkoreunan massavirran tasona 0,562 g/s. Näin saatiin kuvan 7.2 tilanteelle ilmaraon korkeudeksi $h = 12,8 \mu\text{m}$. Tässäkin arviossa paineina käytettiin absoluuttisia paineita, vaikka tämän työn mittaustuloksissa ilmoitetut paineet yleisesti ovat olleet suhteellisia paineita.

$$h = \sqrt[3]{\frac{12 \mu R T \dot{m}_u \ln(r_2/r_k)}{(p_{\max}^2 - p_0^2) \pi}} \quad (7.5)$$

Laskelmiin perustuva arvio ilmaraon korkeudelle mahtuu hyvin Theskan (2004) suositukseen, $h = 5 \dots 15 \mu\text{m}$, sisälle. Silti jo tässä tilanteessa on tullut kontakti vastinpintaan. Näissä arvioissa on kuitenkin otettava huomioon se mittaustulosten perusteella tehty oletus, jonka mukaan tällä tiivistekonstruktioilla ilmarako ei ole tiivistepinnan jouston vuoksi vakio profiilin poikkileikkauksen suunnassa. Lisäksi laakerin massa ja pallonivelen kitka aiheuttavat pallonivelen yli momentin, joka muuttaa tiivistekuorman epätasaiseksi kehän suunnassa.

Kuvaa 7.2 vastaavassa tilanteessa tiivisteiden todellinen ilmarako matalimmassa kohdassaan lienee ollut laskettua arvoa paljon alhaisempi. Tässä saattaa olla yksi ilmakalvon pettämisen selittävistä osatekijöistä. Ilmalaakeripinnan kaarevuudesta johtuvan alhaisen pinta-alan lisäksi selittävänä osatekijänä voi olla se, että tiivistepinnan tarkkuus ja pinnanlaatu eivät ehkä ole olleet riittäviä kosketuksettomaan ilmalaakeritoimintaan, jos todellinen ilmarako on ollut laskettua arvoa merkittävästi alhaisempi.

Energiatehokkuuden arviointi

Mittausten perusteella tiivisteiden alhaisin ilmankulutus kammiopaineella 1,92 bar oli noin 11 l/min. Tiivistemetriä kohti ilmankulutus oli noin 24 l/min. Vastaava paineilmatehoon perustuva energiankulutus tiivistemetriä kohti oli noin 80 W. Paineilmajärjestelmän ja kompressorin 30 % kokonaishyötysuhteella se vastaisi noin 260 W sähkötehoa tiivistemetriä kohti.

Jos paineilmalla taipumakompensoidun telan pituus olisi 6 m ja leveys 80 cm, ilmankulutus olisi suuruusluokkaa $20 \text{ m}^3/\text{h}$ ja sähkönkulutus noin 4 kW. Näitä lukuarvoja voidaan varmastikin madaltaa tiivistekonseptia kehittämällä ja parametreja optimoimalla. Pluskamion tiivistyksen energiankulutus on pyörimisnopeudesta riippumaton. Toisaalta tiivisteiden liikekitka on häviävän pieni, osa telojen sähkökäytöistä voidaan jättää kokonaan pois eikä miinuskammioon keräänny öljyä, jota pitäisi pumpata sieltä pois.

Koelaakeria ajettiin vakiolla tiivisteiden syöttöpaineella, mutta jos tiivisteiden kuorman säätämiseen liittyvät ongelmat saadaan ratkaistua, tiivistepaineeksi riittää kammiopaineen suu-

ruusluokka tai jopa alhaisempikin paine. Ja jos kammiopaineeksi riittää koelaakerilla testatusta maksimipaineesta ($p_K = 1,92$ bar) esimerkiksi kolmasosa, ilmavirtausta saadaan merkittävästi alennettua. Laakeripaineen laskeminen laskee yleensä myös ilmankulutusta. Koska teho on tilavuusvirran ja paine-eron tulo, käytännössä se tarkoittaa sitä, että paineen alentaminen laskee myös energiankulutusta enemmän kuin lineaarisesti. Yllä kuvatulla esimerkkitelalla se voisi suotuisissa olosuhteissa merkitä jopa niinkin alhaista kuin noin 1 kW sähkönkulutusta.

Voidaan pohtia myös sitä, millä tavalla taipumakompensointijärjestelmän tarvitsema paine-ilma kannattaisi tuottaa. Jos taipumakompensointiin riittäisi niinkin alhainen kuin maksimissaan noin 1 bar paine, tätä painetta ei luultavasti olisi viisasta tuottaa mäntäkompressorilla 10 bar paineella, varastoida 10 bar paineeseen ja edelleen käyttää noin 1 bar paineella. Olisi mahdollisesti taloudellisempaa käyttää ruuvi- tai turbiinityyppisiä kompresso-reita pienemmällä paineella ja suuremmalla tuotolla.

7.4 Koelaakerin dynamiikka

Paineilmalla taipumakompensoidun telan pluskammio toimii tukilaakerina, ei asemoivana laakerina. Suurehkosta ilmatilasta johtuva lähes nollatason jäykkyys sekä tämän ilmatilan paineen regulointi aiheuttavat sen, että nippikuorman muutokset eivät käytännössä vaikuta pluskammion kuormaan. Kuormaa pitää muuttaa epäsuorasti mitattuun taipumaan perustuen, tai esiasetetulla tiedossa olevalla kertoimella siten, että taipumaa ei pääse syntymään lainkaan.

Taipumakompensoidun telan pluskammion paineen säätäminen tapahtuisi käytännössä kuormanmuutoksia ennakoiden siten, että nippikuormaa lisättäessä pluskammion painetta lisättäisiin ennalta tunnetussa suhteessa. Varsinainen paineen hienosäätö tapahtuisi ennakkoimattomista kuormanmuutoksista aiheutuvan taipuman suhteen.

Luvun 6.4 askelvastemittausten perusteella laakerin asettuminen halutulle voimatasolle kestää suhteellisen kauan. Tätä asettumisaikaa ei saatu kokeellisesti pienennettyä. Syyksi arveltiin paineilmaregulaattorien dynamiikan vaikutusta koko järjestelmään. Paineilmaregulaattorit sisältävät omat PID-säätimensä.

Mittausjärjestelmä sisältää siis sarjassa olevia PID-säätimiä, joilla on erilaiset aikavakiot. Järjestelmää, jossa ensimmäinen PID-säädin säätää toisen PID-säätimen asetuksia, kutsutaan kaskadisäätimeksi. Näin asetettuna kokonaisjärjestelmän toimintaa on mahdollista nopeuttaa ja aikavakiota pienentää. Mittausjärjestelmän osana käytettyjen paineilmaregulaattorien asetuksia ei kuitenkaan ollut mahdollista muuttaa eikä ohjata Simulink-mittausmallin avulla. Kaskadisäätimen toteuttaminen ei ollut koelaitteiston mittausjärjestelmässä mahdollista.

Paineilmaregulaattorit jättivät mitattuun voimaan aina hetkellisesti suurehkon ylityksen tai alituksen asetettuun arvoon verrattuna. Näitä ei saatu useista kokeista huolimatta poistettua. Mittausmallin voima-kammiopaine -kertoimen pienentäminen joko lisäsi järjestelmän värähtelyä tai hidasti sen toimintaa entisestään.

Mahdollisia kammiovuotoja ja tiivisteen vuotovirtauksen heilahteluita ei pidetty todennäköisenä syynä voimatoimilaitteen suhteellisen hitaaseen reagointiin. Tiivisteen aloituskuorma pidettiin riittävän suurella tasolla askelvastemittauksia suoritettaessa, jotta vuodot pysyivät mahdollisimman vähäisinä. Tästä syystä vuodoilla ei arveltu olevan yhteyttä hitaaseen asettumisaikaan.

Koelaakerin 0,27 litran ilmatilavuuskaan ei ollut syynä pitkään asettumisaikaan, sillä kuvan 6.16 vasteista on selkeästi nähtävissä nousuaikojen olevan kertaluokkaa asettumisaikoja alhaisempia. Ilmavirtauksen riittämättömyys ei siis voinut olla vaikuttamassa asettumisan pituuteen, etenkin kun kammioon syötettiin ilmaa sisähalkaisijaltaan Ø4 mm letkulla, joka ei askelvastemittauksien kammiovirtauksen tasoillakaan aiheuttanut merkittävää painehäviötä eikä tuoton alenemaa.

Askelvaste $F = 500 \dots 3000$ N vastaa kammiopaineen nousua noin 0,1 bar tasolta noin 1,9 bar tasolle noin 0,6 sekunnissa. Jos tehdään sellainen yksinkertaistus, että oletetaan kammion täyttyminen isotermiseksi prosessiksi, tämä vastaa koelaakerin ilmatilavuudella kammiovirtauksen huippua noin 50 l/min. Suoran mittauksen sijaan arvio piti tehdä epäsuorasti, koska kammiovirtauksen mittaukseen käytetyn regulaattorin mittausalueen yläraja oli 10 l/min. Rajoitteella oli merkitystä vain askelvastemittauksissa.

Asetetun ja mitatun voiman lopullisen arvon välinen ero saatiin minimoitua nollassolle säätimen integraattoriosan kertoimella $I = 0,2$. Tämän arvon kasvattaminen ei oleellisesti pienentänyt järjestelmän asettumisaikaa. Derivaattoriosan melko alhaisen arvon ($D = 0,07$) kasvattaminen lisäsi järjestelmän värähtelyherkkyyttä eikä suodattimen näytteiden määrän ($N = 100$) kasvattaminen vähentänyt häiriöherkkyyttä.

Paperikoneissa esiintyy tyypillisesti 10...20 Hz värähtelyä (Roisum 1996: 131). Tällaista on hyvin vaikeaa tai jopa lähes mahdotonta vaimentaa minkäänlaisella aktiivivaimennuksella. Pluskammion painetta säätämällä tuskin olisi mahdollista vaimentaa koneiden kokoon suhteutettuna melko korkeataajuuksisia värähtelyitä. Sen sijaan ilmakammion kokoa muuttamalla voitaisiin vaikuttaa resonanssitaajuuksiin, ja siten passiivinen vaimennus, esimerkiksi Helmholtzin resonaattoriin perustuen, voisi tarvittaessa olla mahdollista.

Oletetaan, että paineilmalla taipumakompensoidussa telassakin nippikuormaa säädettäisiin hydraulisylintereillä. Öljyn kokoonpuristumattomuudesta johtuen nippikuorman säätömekanismi kykenisi reagoimaan haluttuun ohjaukseen nopeammin kuin mitä taipumakompensointia voitaisiin ilmanpainetta muuttamalla säätää. Tämä tulisi ottaa järjestelmän ohjauksessa huomioon siten, että nippikuorman ja taipumakompensoinnin suuruus täsmäisivät

ennalta tunnetulla kertoimella, jota voitaisiin prosessin aikana säätää mitattuun virheeseen perustuen.

Lopputuotteen tasaisen laadun saavuttamiseksi nippikuorman täytyy pysyä ± 10 % sisällä ohjausarvostaan (Roisum 1996: 71). Värähtelyitä ja nopeita muutoksia ei voida nippiä ja taipumakompensoinnin suuruutta säätämällä korjata, mutta rainan paksuusvaihtelun pitempiaikaiset hitaammat satunnaismuutokset voidaan. Siihen paineilmakäyttöisenkin järjestelmän nopeus riittänee.

Luku 8

Johtopäätökset

Työssä käsiteltiin aerostaattisen tiivisteiden suunnittelua ja suoritusarvomittauksia. Tiivistettä testattiin osana ilmalaakeria, jonka toiminnallinen rakenne koostui vain pelkästä ilmakammista ja laserreivitetystä aerostaattisena laakerina toimivasta tiivistereunasta. Tiivisteen suunnittelussa oli pyritty ottamaan huomioon sen mahdollinen soveltaminen osaksi paineilmaikäyttöistä paperikonetelan taipumakompensointijärjestelmää, mutta useita telasovellukseen liittyviä ongelmia jäi toistaiseksi selvittämättä. Tästä huolimatta työn aikana vahvistui ajatus siitä, että paineilmaikäyttöisen taipumakompensointijärjestelmän rakentaminen olisi mahdollista, ja että tällainen järjestelmä voisi olla energiatehokas.

Suurehkon ilmatilan vuoksi sekä paineilmalla taipumakompensoidun telan pluskammion että työssä testatun tyyppisen kammiollisen ilmalaakerin jäykkyydet ovat hyvin alhaisia, käytännössä lähes nollatasoa kammiottomiin ilmalaakereihin verrattuna. Toiminnallisesti kammiolliset ilmalaakerit ovat kuitenkin säädettäviä tukilaakereita, eivätkä asemoivia laakereita, joten alhainen jäykkyys ei ole merkittävä ongelma.

Koelaakerin ilmankulutus alitti vaatimuslistassa esitetyn tason. Ongelmia oli stabiliteetin suhteen ajettaessa laakeria kaltevalla vastinpinnalla. Kun ilmankulutuksen minimoimiseksi ja kuormaletkun välistä tapahtuneen ylimääräisen vuodon minimoimiseksi tiivistekuormaa kasvatettiin yli kriittisen rajan, tiivistereunan ilmakalvo petti. Tätä ei voitaisi hyväksyä telasovelluksen toiminnalta. Syyksi kontaktiin arveltiin laakerin kiinnityksen pallonivelen kitkasta aiheutuvaa momenttia, joka muutti tiivistepinnan kehän suuntaisen kuorman epätasaiseksi. Telakonstruktiossa tällainen ongelma toisaalta olisi vältettävissä.

Koelaakerin tiivisteiden kuorman säätäminen vaati suurta tarkkuutta. Synä tähän pidettiin yhtäältä ongelmia laakerin tiiviiden kanssa ja toisaalta tiivistepinnan muuttumista kaarevaksi tiivisteiden syöttöpaineen seurauksena. Kun tiivistekuormaa pienennettiin, vuodot kasvoivat liian suuriksi. Kun tiivistekuormaa suurennettiin yli kriittisen rajan, tiivisteiden ilmalaakeritoiminta petti. Tiivistekuorman käyttökelpoinen toimialue tällä konstruktiolla osoittautui kapeaksi.

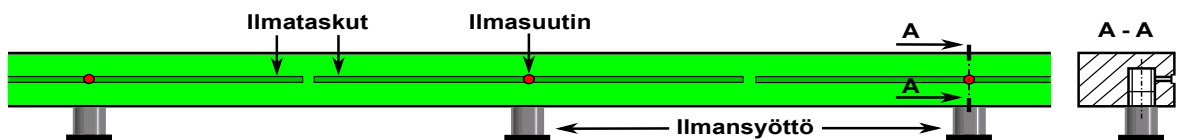
Näiltä ongelmilta voitaisiin välttyä, jos kammion tiiviys ei olisi kuormaletkun varassa, vaan se olisi erillisellä kalvomaisella kammion ja tiivisteiden yhdistävällä rakenteella varmistettu. Kammiopaineesta aiheutuisi myös tähän kalvoon ylimääräinen tiivisteiden asemoimista ja kuorman säätöä häiritsevä voima. Siksi tämän ylimääräisen tiivistyksen, esimerkiksi kalvon, pitäisi olla pinta-alaltaan mahdollisimman pieni.

Valmistetulla tasomaisella laakerilla ei testattu tällaisia telaan liittyviä erityisongelmia. Myöskään pääty- ja aksiaalitiivistekäytön liitokseen ei luotu vertailutilannetta. Selvittämättä jäi sekin, voisiko taipumakompensoidun telan tiivistekonsepti perustua yhtenäiseen koko pluskammion kiertävään tiivistereunaan. Selvää ainakin on se, että jos tiiviste valmistetaan huokoisesta grafiitista, se pitäisi valmistaa pienehköistä paloista yhteen liittämällä, jotta tiivisteelle saataisiin riittävä mukautumiskyky. Pääty- ja aksiaaliosan liitokset voisivat mahdollisesti tässä tapauksessa olla samanlaisia kuin tiivistepalojen muutkin liitokset.

Tiivistemateriaalina POM osoittautui käyttökelpoiseksi. Materiaalinvalintaa ei kuitenkaan tässä tutkimuksessa suoritettu erityisen systemaattisesti eikä selvitetty sitä, mikä olisi taipumakompensoidun telan näkökulmasta paras mahdollinen valmistusmateriaali kammiotiivisteille. Jatkotutkimuksissa on suositeltavaa käyttää FEM-mallinnusta tiivistereunan jouston arviointiin, ja käyttää tätä tietoa myös materiaalinvalinnan sekä kammiotiivisteiden ripustuksen suunnittelun tukena.

Laserporausten osalta työssä päästiin tavoitteeseen. Reikien halkaisija oli riittävän pieni testatun tiivistekonseptin toimivuuden kannalta. On kuitenkin suositeltavaa jakaa tiiviste-pinta pituussuunnassa erillisiin suutinkohtaisiin ilmataskuihin. Näin ilmakuristusten lukumäärää saataisiin vähennettyä ja niiden halkaisijaa suurennettua, mikäli tämä katsottaisiin tarpeelliseksi.

Ontto tiivisterakenne on valmistusteknisesti haasteellinen. Käyttämällä riittävän pitkiä ilmataskuja (Kuva 8.1) tiiviste ei välttämättä tarvitsisi olla ontto. Ilmansyöttö voitaisiin tuoda yksittäisillä porauksilla kullekin ilmasuuttimelle erikseen. Umpinaisella rakenteella tiivisteiden jäykkyys profiilin poikkileikkauksen suunnassa kasvaisi ja syöttöpaineen vaikutus tiivisteiden muotoon saataisiin eliminoidua.



Kuva 8.1: Kammiotiiviste on mahdollista valmistaa umpinaisesta yksinkertaisesta aihioista, jos ilma syötetään kullekin tiivisteiden suuttimelle omalla erillisellä tulolla, ja jos tiiviste jaetaan pituussuunnassa erillisiin suutinkohtaisiin ilmataskuihin.

Aiemmissa ilmalaakeritutkimuksissa ilmaraon mittaukseen on käytetty pyörrevirta-antureita. Tämän tutkimuksen laakerikokeissa tiivisteiden ilmarakoa ei mitattu. Pyörrevirta-anturien kiinnittäminen tiivisteeseen osoittautui hyvin vaikeaksi. Jatkotutkimuksia varten olisi suositeltavaa selvittää, miten tiivistereunan ilmarako olisi kohtuullisella vaivalla mitattavissa, ja minkälainen anturi tähän parhaiten soveltuisi.

Lähdeluettelo

- Alanen, R. & Koljonen, T. & Hukari, S. & Saari, P. 2003. *Energian varastoinnin nykytila*. VTT Tiedotteita 2199. VTT Tietopalvelu. VTT Prosessit, Espoo, Suomi. 169 s. [Viitattu 8.10.2016]. Saatavissa: <<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2003/T2199.pdf>>. ISBN 951-38-6160-0. ISSN 1455-0865.
- Andritz Küsters GmbH. 2016. Andritz Küsters GmbH, Eduard-Küsters-Str. 1, 47805 Krefeld, Deutschland. [Viitattu 1.8.2016]. Saatavissa: <<http://www.andritz.com/>>.
- Araki, R. & Takita, A. & Nachaisit, P. & Shu, D. & Fujii, Y. 2015. *Frictional characteristics of a small aerostatic linear bearing*. Lubricants – Open Access Tribology Journal. Vol. 3:2. S. 132-141. [Viitattu 4.6.2016]. Saatavissa: <<http://www.mdpi.com/2075-4442/3/2/132/pdf>>. DOI: 10.3390/lubricants3020132. ISSN 2075-4442.
- Barnett, M. & Silver, A. 1970. *Applications of air bearings to high-speed turbomachinery*. AiResearch Manufacturing Co. SAE Technical paper 700720. SAE International. [Viitattu 1.11.2016]. Saatavissa: <<http://papers.sae.org/700720/>>. DOI: 10.4271/700720.
- Beater, P. 2007. *Pneumatic drives: system design, modelling and control*. 1st ed. New York, USA: Springer. 322 s. ISBN 978-3-540-69470-0.
- Biermann, C. 1996. *Pulping and papermaking*. 2nd ed. London, UK: Academic Press Limited. 732 s. ISBN 978-0-12-097362-0.
- Björklund, N. 1990. *Valmet - Asetehtaiden muuntuminen kansainväliseksi suuryhtiöksi*. 1. painos. Jyväskylä, Suomi: Gummerus Oy. 355 s. ISBN 952-90-2552-1.
- Calonius, O. & Kiviluoma, P. & Kuosmanen, P. 2012. *Air bearings for heavy duty industrial applications – effect of bearing type and operating conditions on energy efficiency*. 8th International Fluid Power Conference. Technical University of Dresden, Germany. 26-28.3.2012. [Viitattu 8.8.2016]. Saatavissa: <<http://www.juuli.fi/Record/juuli2012-659>>.
- Charki, A. & Diop, K. & Champmartin, S. & Ambari, A. 2013. *Numerical simulation and experimental study of thrust air bearings with multiple orifices*. International Journal of Mechanical Sciences. Vol 72. S. 28-38. [Viitattu 5.6.2016]. Saatavissa: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01061923>>. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2013.03.006.
- Chin, J. & Gray, J. & Jones, S. & Berton, J. 2015. *Open-Source conceptual sizing models for the Hyperloop passenger pod*. 56th AIAA SciTech Forum, Kissimmee, Florida, USA. 5-9.1.2015. [Viitattu 25.4.2017]. Saatavissa: <<https://mdao.grc.nasa.gov/publications/AIAA-2015-1587.pdf>>. DOI: 10.2514/6.2015-1587.

- Dellacorte, C. 2008. *A New foil air bearing test rig for use to 700 °C and 70,000 rpm*. Tribology Transactions. Vol 41:3. S. 335-340. [Viitattu 27.10.2016]. Saatavissa: <<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19970010249.pdf>>. DOI: 10.1080/10402009808983756.
- Dellacorte, C. 2016. *Technical development path for gas foil bearings*. Oil Free Turbomachinery Program. NASA Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, USA. [Viitattu 1.1.2017]. Saatavissa: <<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20160013553.pdf>>. 51 s. GRC-E-DAA-TN 32211. DOI: 10.1115/IJTC2008-71024. ISBN: 0-7918-4336-9 (painettu).
- Pat. US 8753014 B2. 2014. *Air bearing for use as a seal*. New Way Machine Components, Aston, Pennsylvania, USA. (Devitt, A.) US 13/733,806, 3.1.2013. Julk. 17.6.2014. 38 s.
- Etra Oy. 2017. *Tuoteluettelo - Tekniset muovit*. Etola Yhtiöt. Lampputie 2, Helsinki. [Viitattu 16.1.2017]. Saatavissa: <<http://tuotteet.etra.fi/fi/g2228980/koneenrakennusmuovit>>.
- Pat. FI 120112 B. 2009. *Menetelmä telan ulkovaipan ja sisävaipan liittämiseksi*. Metso Paper Oy. Helsinki, Suomi. (Hakola, J.) 20075940, 20.12.2007. Julk. 21.6.2009. 16 s.
- Holmberg, K. & Siilasto, R. & Laitinen, T. & Andersson, P. & Jäsberg, A. 2012 (Verkkojulkaisu 2013). *Global energy consumption due to friction in paper machines*. Tribology International. Vol 62. S. 58-77. [Viitattu 6.2.2017]. Saatavissa: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2013.02.003>>. DOI: 10.1016/j.triboint.2013.02.003.
- Hou, Y. & Zhu, Z. H. & Chen, C. Z. 2000 (Verkkojulkaisu 2008). *The Experimental study of aerodynamic plate-foil journal bearings for high speed cryogenic turboexpander*. Tribology Transactions. Vol 43:4. S. 681-684. [Viitattu 1.11.2016]. Saatavissa: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10402000008982396>>. DOI: 10.1080/10402000008982396.
- Houlihan, R & Kraft, M. 2005. *Modelling squeeze film effects in a MEMS accelerometer with a levitated proof mass*. Journal of Micromechanics and Microengineering. Vol 15:5. S. 893-902. [Viitattu 1.1.2017]. Saatavissa: <http://users.ecs.soton.ac.uk/mk1/jmm_squeeze_damp_lev_disk.pdf>. DOI: 10.1088/0960-1317/15/5/001.
- Jokinen, J. 1988. *Tykki taipui paperikoneeksi*. 1. painos. Jyväskylä, Suomi: Gummerus Oy. Valmet Paperikoneet Oy. 291 s. ISBN 951-95880-6-X.
- Kivelä, R. 2013. *Tiivistereunallisen aerostaattisen laakerin suunnittelu*. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Konetekniikan osasto. Espoo. 84 s.
- KnowPap. 2016. *KnowPap -oppimisympäristö – Paperin ja kartongin valmistusprosessi*. Prowledge Oy. Vanha talvitie 11 C, Helsinki. [Viitattu 28.12.2016]. Saatavissa: <http://www.knowpap.com/www_demo/suomi/paper_technology/general/5_papermaking/>.

- Pat. FI 123283 B. 2013. *Säädettävävaippainen tela, laitteisto ja menetelmä*. Metso Paper Oy. Helsinki, Suomi. (Korolainen, T.) 20095899, 2.9.2009. Julk. 31.1.2013. 19 s.
- Kuang-Chao, F. & Chi-Chung, H. & Jong-I, M. 2002. *Development of a multiple-microhole aerostatic air bearing system*. Journal of Micromechanics and Microengineering. Vol 12:5. S. 636-643. [Viitattu 8.6.2016]. Saatavissa: <<http://iopscience.iop.org/0960-1317/12/5/319>>. DOI: 10.1088 /0960-1317/12/5/319>.
- Pat. US 5725465 A. 1998. *Method for operating a roller and corresponding roller*. Eduard Küsters Maschinenfabrik GmbH & Co. Kg, Krefeld, Nordrhein-Westfalen, Saksa. (Küsters, K.) US 08/624,571, 12.8.1994. Julk. 10.3.1998. 6 s.
- Muzakkir, S. & Hirani, H. 2015. *Maintenance free bearings*. International Journal of Engineering Research. Vol. 4:3. S. 133-136. [Viitattu 4.6.2016]. Saatavissa: <http://www.ijer.in/ijer/publication/v4s3/IJER_2015_311.pdf>. ISSN 2319-6890 (sähköinen) ISSN 2347-5013 (painettu).
- Müller, L. 1994. *Desenvolvimento de um cabeçote de precisão*. Diplomityö. Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de pós-graduação em engenharia mecânica. Florianópolis, Brasilia. 108 s.
- Nelson Air Corp. 2016. PI Nelson Air Corp., 559 Route 13 South, PO Box 2, Milford, New Hampshire 03055, USA. [Viitattu 1.10.2016]. Saatavissa: <<http://www.nelsonair.com/>>.
- New Way Air Bearings. 2016. New Way Air Bearings, 50 McDonald Boulevard, Aston, Pennsylvania, USA. [Viitattu 1.10.2016]. Saatavissa: <<http://www.newwayairbearings.com>>.
- Ovaska, S. & Laplante, P. 2012. *Real-time system design and analysis – Tools for the practitioner*. 4th ed. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE Press. John Wiley & Sons. 502 s. ISBN 9781118136577.
- Powell, J. W. 1970. *Design of aerostatic bearings*. 1st ed. New England Street, Brighton, UK: Machinery Publishing Co. 280 s. ISBN 0-204-85333-5.
- Pyroll Oy. 2016. *Tuoteluettelo – Pakkauskartongit*. Pyroll Oy. Kalliotie 2, Tuusula. [Viitattu 27.12.2016]. Saatavissa: <<http://www.pyroll.com/tuotteet/>>.
- Rantanen, H. 2016. Konepaja-asiantuntija. Aalto-yliopisto. Haastattelu 20.9.2016.
- Riala, M. & Laitila, J. & Viitanen, J. & Mutanen, A. 2015. *Massa- ja paperiteollisuuden vienti ja tuotanto - Metsäsektorin suhdannekatsaus 2014-2015*. Helsinki, Suomi: Metla. Luonnonvarakeskus. [Viitattu 1.10.2016]. Saatavissa: <<http://www.metla.fi/julkaisut/isbn/978-951-40-2491-7/suhdannekatsaus-2014-2015.pdf>>. ISBN 978-951-40-2491-7. ISSN 1796-0053.

- Pat. US 4062097 A. 1977. *Roll having magnetic deflection compensation*. Valmet Oy, Järvenpää, Suomi. (Riihinen, J.) US 05/755,548, 30.12.1976. Julk. 13.12.1977. 6 s.
- Roisum, D. 1996. *Mechanics of Rollers*. 1st ed. Atlanta, Georgia, USA: TAPPI Press. 306 s. ISBN 0-89852-313-3.
- Salvatore, N. & Pagnotta, L. & Pantano M. F. 2012. *A Numerical study of squeeze-film damping in MEMS-based structures including rarefaction effects*. Frattura ed Integrità Strutturale. Vol 23. S. 103-113. [Viitattu 25.1.2017]. Saatavissa: <<http://www.wseas.us/e-library/conferences/2012/Rovaniemi/IMMURO/IMMURO-05.pdf>>. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.23.11. ISBN 978-1-61804-085-5.
- Pat. US 5338279 A. 1994. *Hydrostatically supported sag-compensation roll, in particular for paper manufacturing machines*. J. M. Voith GmbH, Heidenheim, Germany. (Shiel, C.) US 08/030,150, 10.7.1992. Julk. 16.8.1994. 10 s.
- Space Exploration Technologies Corp. 2016. *Hyperloop Alpha*. SpaceX Technologies Corp. Rocket Road, Hawthorne, California, USA. [Viitattu 26.10.2016]. Saatavissa: <http://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf>.
- Theska, R. 2004. *Air bearings and guides*. 41 s. Luentokalvot. Ilmenau University of Technology, Saksa. Prof. René Theskan 18.2.2004 Teknillisellä korkeakoululla pitämä luento.
- Tulli. 2016. *Suomen virallinen tilasto: Tavaroiden tuonti ja vienti tuoteluokittain ja toimialoittain*. Tulli, Suomi. [Viitattu 1.1.2017]. Saatavissa: <<http://uljas.tulli.fi/>>. ISSN 1796-0479.
- Valmet Technologies Oy. 2016. Valmet Kartonki ja Paperi, Valmet Technologies Oy, Valmet Oyj, Wärtsiläntie 100, Järvenpää, Suomi. [Viitattu 1.6.2016]. Saatavissa: <<http://www.valmet.com/>>.